5.19

Spektrum der Wissenschaft

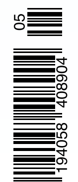
www.Spektrum.de 5.19

Warum sterben die Insekten?

Der dramatische Verlust für unser Ökosystem



8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



Physik Der vierdimensionale Quanten-Hall-Effekt

Künstliche Intelligenz Algorithmen erschaffen eigenständig Kunstwerke

Astronomie Die ersten Galaxien



EDITORIAL
HEIMLICHES VERSCHWINDEN

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Jetzt geht es wieder los im Garten: Überall sprießt und grünt es, die Vögel zwitschern um die Wette, dazu im Hintergrund das stete Summen und Brummen der zahllosen Insekten. Besonders faszinieren meine Familie und mich dabei die großen, dunklen Holzbienen mit ihrem charakteristischen sonoren Sound. Später im Sommer ziehen dann die Schmetterlinge ihre Show ab, die sich gern um den Sommerflieder tummeln.

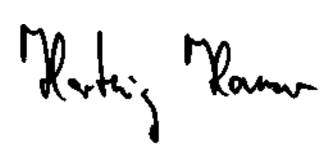
Umso größer war meine Überraschung, als im Herbst 2017 die Ergebnisse der Krefelder Insektenstudie bekannt wurden. Offenbar geht es den kleinen Sechsbeinern nämlich ziemlich schlecht. Nicht nur die Artenzahl, vor allem auch schlicht die Biomasse, also die Anzahl an Individuen, hat in den letzten Jahrzehnten dramatisch abgenommen, in Extremfällen um bis zu 80 Prozent.

Kaum zu glauben – belegte nicht das rege Leben vor unserer Tür das Gegenteil? Aber dann erinnerte ich mich daran, wie früher regelmäßig die Blüte unseres Kiwistrauchs für ein Spektakel sorgte: Massen an Hummeln drängelten sich um die Blüten, das dröhnende Brummen war überwältigend. In den letzten Jahren dagegen waren dort oft nur einzelne Tiere zu sehen. Zwar liefert die Pflanze weiterhin üppige Ernten – doch was, wenn die Bestäuber ganz ausbleiben?

Geht es um die Insektenfauna, mag der eine oder andere insgeheim ja ganz froh sein, falls es weniger lästige Fliegen, Mücken oder Wespen geben sollte. Und vergisst dabei, wie wichtig diese und andere Arten im ökologischen Kontext sind: Sie dienen zahllosen Vögeln und Fledermäusen als Nahrung und spielen darüber hinaus eine entscheidende Rolle als Bestäuber jener Nutzpflanzen, von denen wir uns ernähren. Auf diese Zusammenhänge weist Josef Settele in seinem Artikel ab S. 12 hin. Für **Spektrum** hat der Professor am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Halle und Schmetterlingsexperte den aktuellen Forschungsstand zu Diversität und Häufigkeit der Insekten zusammengetragen – und macht die wahrscheinlichsten Ursachen hinter den Veränderungen fest.

Besonders bedenkenswert finde ich seinen Hinweis, dass jeder Einzelne von uns etwas tun kann. Selbst auf dem Balkon lassen sich Pflanzen kultivieren, die für Insekten wichtige Nahrung liefern, und »Insektenhotels« aufhängen. Und in etwas größeren Gärten stört es sicher nicht, wenn man in einer Ecke einfach mal ein paar alte Äste stapelt, die den kleinen Helfern ein Zuhause bieten können. Wir halten es jedenfalls so bei uns; und vielleicht ist das ja der Grund, warum uns immer noch Wildbienen und Schmetterlinge umschwirren, wenn wir im Sommer vor die Tür treten.

Herzlich, Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Archäologie – Geschichte – Kultur 1.19 dreht sich um Alexander den Großen und dessen ebenso riesiges wie kurzlebiges Weltreich.

IN DIESER AUSGABE


JACOBS FOUNDATION

MICHAEL TOMASELLO

Der Max-Planck-Wissenschaftler erforscht die soziale Kognition bei Menschen und anderen Primaten. Ab S. 34 schildert er, wie unser Moralgefühl entstand.



DAN COE

Mit einer ausgeklügelten Suchstrategie und dem Hubble-Weltraumteleskop hat der US-Astronom das All nach besonders weit entfernten Galaxien durchforstet (S. 46).



AHMED ELGAMMAL

Wer ist der Urheber eines per künstlicher Intelligenz geschaffenen Kunstwerks? Fragen wie diese diskutiert der Professor für Computerwissenschaften ab S. 68.

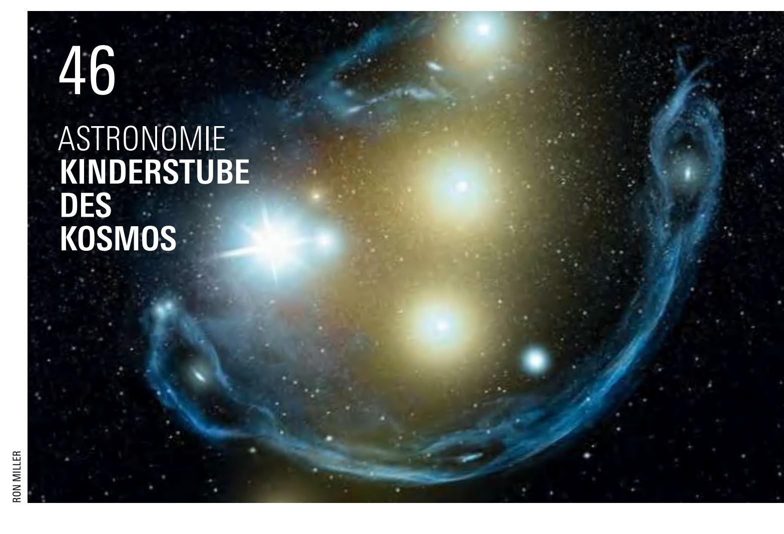
INHALT

TITELBILD:
DTIMIRAOS / GETTY IMAGES / ISTOCK

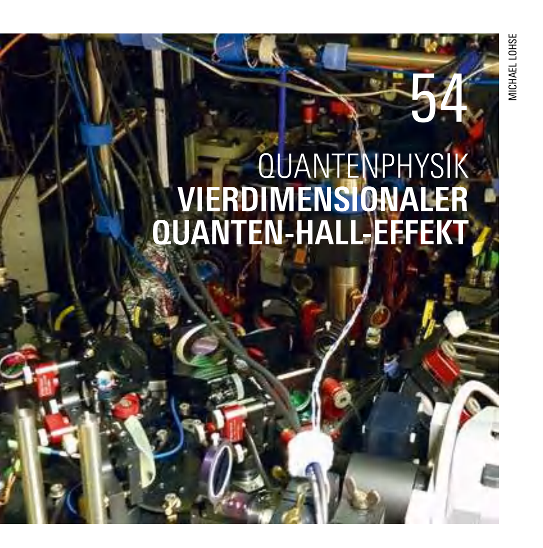
4U4ME / GETTY IMAGES / ISTOCK



NO_LIMIT_PICTURES / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



RON MILLER



MICHAEL LOHSE


AHMED ELGAMMAL, ART & AI LAB RUTGERS UNIVERSITY



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf Spektrum.de berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



DIE QUELLEN DES LITHIUMS

Nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur könnten im Jahr 2030 weltweit 125 Millionen Elektroautos unterwegs sein – heute sind es knapp sechs Millionen. Im Zuge dieser Mobilitätswende müsste auch die Zahl der Anlagen zur Gewinnung von Lithium dramatisch steigen, das in den Batterien der Fahrzeuge zum Einsatz kommt. Die Aufnahme des NASA-Satelliten Landsat-8 zeigt eine dieser Förderstätten in der Salar de Atacama im Norden Chiles, wo Experten knapp ein Drittel der derzeit bekannten Lithiumvorkommen vermuten.

Unter der Kruste der Salzwüste verbergen sich große Mengen zähflüssigen Salzwassers, das Ionen des Leichtmetalls enthält. Unternehmen pumpen die Flüssigkeit nach oben und sammeln sie in mit Plastik ausgekleideten Becken. Beim Verdunsten bleibt dann das lithiumhaltige Salz zurück. Die Farbe der Becken verrät dabei die Konzentration des begehrten Stoffs: Hellblaue Becken haben einen besonders hohen Lithiumgehalt. Die Gewinnung strapaziert jedoch die knappen Wasservorräte in der Region, weshalb es immer wieder zu Konflikten mit Umweltschützern kommt.

Mitteilung des NASA Earth Observatory

NASA EARTH OBSERVATORY, LAUREN DAUPHIN (EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV/IMAGES/144393/WHERE-BATTERIES-BEGIN)



NASA EARTH OBSERVATORY, LAUREN DAUPHIN
(EARTHOBSERVATORY.NASA.GOV/IMAGES/144393/WHERE-BATTERIES-BEGIN)


Heute ist das Lunpolabecken eine raue Hochebene. Früher lag die Gegend vermutlich deutlich tiefer.

TAO SU, UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, BEIJING


Vor 25 Millionen Jahren wuchsen in Tibet Palmen, wie dieses Fossil zeigt.

TAO SU, UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, BEIJING

GEOLOGIE
PALMEN IN TIBET

Eine überraschende Entdeckung in 4655 Meter Höhe stellt bisherige Annahmen über das »Dach der Welt« in Frage: Im Boden eines ausgetrockneten tibetischen Sees fand eine britisch-chinesische Arbeitsgruppe Fossilien von 25,5 Millionen Jahre alten Palmwedeln. Sie sind damit überraschend jung. Viele Geologen gehen davon aus, dass Tibet zu dieser Zeit bereits ein weitgehend ebenes Hochland war – schließlich ließ der Zusammenstoß von indischer und eurasischer Kontinentalplatte schon vor 35 bis 40 Millionen Jahren den benachbarten Himalaja aufsteigen.

Die neu identifizierte Palmenart *Sabalites tibetensis* aus dem Lunpolabecken stehe im Widerspruch zu dieser Theorie, argumentieren die Forscher um Tao Su vom Xishuangbanna Tropical Botanical Garden in Mengla. Denn mit hoher Wahrscheinlichkeit habe die Pflanze nur in gemäßigtem Klima gedeihen können. Der kälteste Monat dürfte allenfalls eine Durchschnittstemperatur von 5 Grad Celsius gehabt haben, der Jahresmittelwert müsste bei mindestens 14 Grad gelegen haben.

Solche Bedingungen seien nur dann denkbar gewesen, wenn die Landschaft vor 25,5 Millionen Jahren maximal 2300 Meter über dem Meeresspiegel lag, berichtet das Team nach Auswertung verschiedener Klimaszenarien. Außerdem müsste das Tal von 4000 Meter hohen Bergen eingerahmt gewesen sein. Vermutlich habe das »Dach der Welt« daher erst später als gedacht seine heutige Höhe und Form erlangt, schreiben die Wissenschaftler.

Science Advances
10.1126/sciadv.aav2189, 2019

PHYSIK
ABSTOSSENDER CASIMIR-EFFEKT

Der Casimir-Effekt ist eine Besonderheit der Quantenwelt: Platziert man zwei ungeladene Metallplatten parallel nebeneinander und lässt nur einen winzigen Spalt zwischen ihnen, werden sie wie von Zauberhand zusammengedrückt. Nach Ansicht der meisten Physiker sind »virtuelle« Photonen verantwortlich, die ständig im Vakuum aufploppen und sich nach einigen Sekundenbruchteilen paarweise auslöschen. Im Zwischenraum der Platten können weniger dieser Teilchen entstehen als auf den Außenseiten; durch die Zusammenstöße zwischen Photonen und Platten ergibt sich somit insgesamt eine nach innen gerichtete Kraft.

Aber muss das immer so sein? Bereits in der Vergangenheit haben Physiker gezeigt, dass Platten aus unterschiedlichen Materialien durch den Casimir-Effekt auch auseinandergedrückt werden können. Bei identischen Körpern schlossen sie eine abstoßende Kraft bisher jedoch aus, da sie im Widerspruch zu Symmetrieprinzipien zu stehen scheint.

Qing-Dong Jiang von der Universität Stockholm und Frank Wilczek vom Massachusetts Institute of Technology haben nun ein Schlupfloch in dieser Regel entdeckt. Mit einem Trick könne man die Casimir-Kraft nach außen richten und dreimal so stark werden lassen wie die nach innen orientierte, berichten die Wissenschaftler nach aufwändigen Rechnungen. Möglich macht es ein »chirales« Spezialmaterial, das man zwischen die Platten schiebt und das die Polarisationsrichtung von Lichtteilchen geschickt dreht. Auf diese Weise könne man einigen der virtuellen Photonen unter die Arme greifen, argumentieren die Physiker. Zusammen mit einem Magnetfeld ließe sich so letztlich die Stärke und Richtung des Casimir-Effekts steuern.

Ob das in der Realität funktioniert, müssen nun Labormessungen zeigen. Falls ja, ist eine Anwendung in der Nanotechnologie denkbar: Hier besteht eine Herausforderung darin, winzige Bauteile auf immer weniger Platz unterzubringen – ohne dass sie dabei wie von Zauberhand zusammengedrückt werden.

Physical Review Letters
10.1103/PhysRevB.99.125403, 2019

ZOOLOGIE

BALZFUNK DER ZIKADEN

Britische Forscher haben in Spitzkopfzikaden ein bis dato unbekanntes Kommunikationsinstrument zur Anbahnung sexueller Kontakte aufgespürt: Männchen und Weibchen produzieren mit einer blitzschnell vor- und zurückschnellenden Unterkörperstruktur Vibrationen, die das andere Geschlecht noch in einiger Entfernung wahrnimmt und beantwortet. Mit Hilfe der für Menschen unhörbaren Balzfunkwellen finden sich die Zikaden dann zur Paarung zusammen, berichten Beth Mortimer und ihre Kollegen von der University of Oxford.

Die Zikade kann das Schnalz- oder Schnapporgan aktivieren, indem sie per Muskelkontraktion Energie auf eine elastische Gewebestruktur überträgt. Daraufhin schnellt diese wie ein Sprungbrett auf und ab und überträgt die Schwingungen auf den Boden.

Die Forscher sind durch Zufall auf den Vibrationssender gestoßen. Eigentlich analysierten sie Zikaden der Spezies *Agalmatium bilobum* für einen Artenvergleich in einem Synchrotron-Teilchenbeschleuniger – eine Technik, die das scharfe Fokussieren auf winzige Details erlaubt. Mit Mikrotomografie, Hochgeschwindigkeitsfotografie und weiteren Methoden enthüllten die Zoologen zusammen mit Kollegen aus den Ingenieurwissenschaften schließlich die Arbeitsweise des Organs.

Anschließend sammelte und untersuchte das Team hunderte weitere Zikaden – und stellte fest, dass der Sprungbrettvibrator bei Männchen wie Weibchen offenbar zur Grundausstattung aller Familien der Spitzkopfzikaden gehört. Bei ihnen handelt es sich um eine Unterordnung, zu der auch wirtschaftlich bedeutende Schädlinge zählen, die bakterielle Infektionen von Nutzpflanze zu Nutzpflanze übertragen. Das jetzt entdeckte Kommunikationsorgan muss in der Evolution dieser Tiergruppe schon sehr früh entstanden sein: Spitzkopfzikaden rufen vermutlich seit rund 250 Millionen Jahren mit Hilfe von Vibrationen nach Geschlechtspartnern.



Männliche Zikaden locken Weibchen per Vibration an.

LEONIDAS-ROMANOS DAVRANOGLOU, UNIVERSITY OF OXFORD

PLoS Biology 17, e3000155, 2019

GENETIK
RIESENVIRUS VERWANDELT WIRT ZU STEIN

Riesenviren sind eine Gruppe infektiöser Partikel, über die Wissenschaftler bisher wenig wissen. Eine Gruppe um Hiroyuki Ogata von der Universität Kyoto hat nun eine bisher unbekannte Version dieser DNA-Viren in einer heißen Quelle in Japan aufgespürt. Die Forscher tauften das Virus auf den Namen Medusa, das die neue Familie Medusaviridae begründet. Wie seine Namensgeberin aus der griechischen Mythologie verwandelt es seine Opfer – Amöben der Art *Acanthamoeba castellanii* – gewissermaßen zu Stein.

Im Gegensatz zu anderen DNA-Viren, die sich im Zytoplasma der infizierten Zellen vervielfältigen, lässt das Medusavirus seine Nachkommen innerhalb des Zellkerns der Amöbe zusammenbauen. Dabei sorgt eines der Wirtsenzyme dafür, dass die Amöbe eine harte Außenhülle bildet, in der sich der Eindringling ungestört replizieren kann.

Das Virus selbst schützt sein Erbgut durch einen mit Hunderten von Stacheln überzogenen Panzer, an deren Enden runde Köpfe sitzen. Diese Stacheln erinnern damit ebenfalls an die mythologische Schreckensgestalt mit ihren Schlangenhaaren auf dem Haupt.

Der Vergleich der Gensequenzen von Amöbe und Riesenvirus deutet auf einen »horizontalen« Gentransfer hin, bei dem Wirt und Parasit Erbmaterial ausgetauscht haben. Demnach könnten DNA-Viren bei der Evolution eukaryotischer Lebewesen – Pilze, Pflanzen und Tiere – eine wichtige Rolle gespielt haben, spekulieren die Forscher.

Journal of Virology 10.1128/JVI.02130-18, 2019

ARCHÄOLOGIE
DAS SILBER DER PHÖNIZIER

Die Phönizier waren ein rätselhaftes Volk: Oft untereinander verfeindet, kolonisierten sie im 1. Jahrtausend v. Chr. vom heutigen Libanon und Israel aus große Teile des Mittelmeerraums. Dabei gründeten sie nicht nur Karthago, sondern drangen sogar bis an die Atlantikküste vor.

Wann und warum sie aus ihrer Heimat aufbrachen, ist bis heute umstritten. Eine neue Studie legt nun nahe, dass sie sich wohl früher ins Unbekannte vorwagten als gedacht – und in erster Linie lossegelten, um neue Silbervorkommen zu erschließen.

Dafür sprechen jedenfalls Analysen von Silberbruchstücken aus dem heutigen Israel. Anhand von Bleiisotopen fand das Team um Tsilla Eshel von der Universität in Haifa heraus, dass das Silber im 10. Jahrhundert v. Chr. in Sardinien und im 9. Jahrhundert v. Chr. im Südwesten der Iberischen Halbinsel abgebaut wurde. Damit wären die Phönizier mindestens 200 Jahre früher aufgebrochen, als die meisten Experten bisher vermuten.

Ein Hinweis darauf findet sich sogar in der Bibel. Das erste Buch der Könige berichtet von Expeditionen, die König Salomon gemeinsam mit dem Phönizierkönig Hiram von Tyros unternommen hat, um Gold, Silber und andere Luxusgüter aus einem Land namens Tarschisch in ihre Heimat zu bringen. Damit könnte das Königreich von Tartessos in Südwestspanien gemeint sein, das in der Antike für seinen sagenhaften Silberreichtum bekannt war. Auch griechische und römische Quellen berichten, dass die Phönizier dort einst Silber gewonnen haben.



WARHAFTIG VENEZIAN / ISRAEL ANTIQUITIES AUTHORITY

Immer wieder brachten die Phönizier Bottiche voll Silber in ihre Heimat, das heutige Israel.

PNAS 10.1073/pnas.1817951116, 2019

SONNENSYSTEM
EUROPAS OZEAN BEWEGT SICH

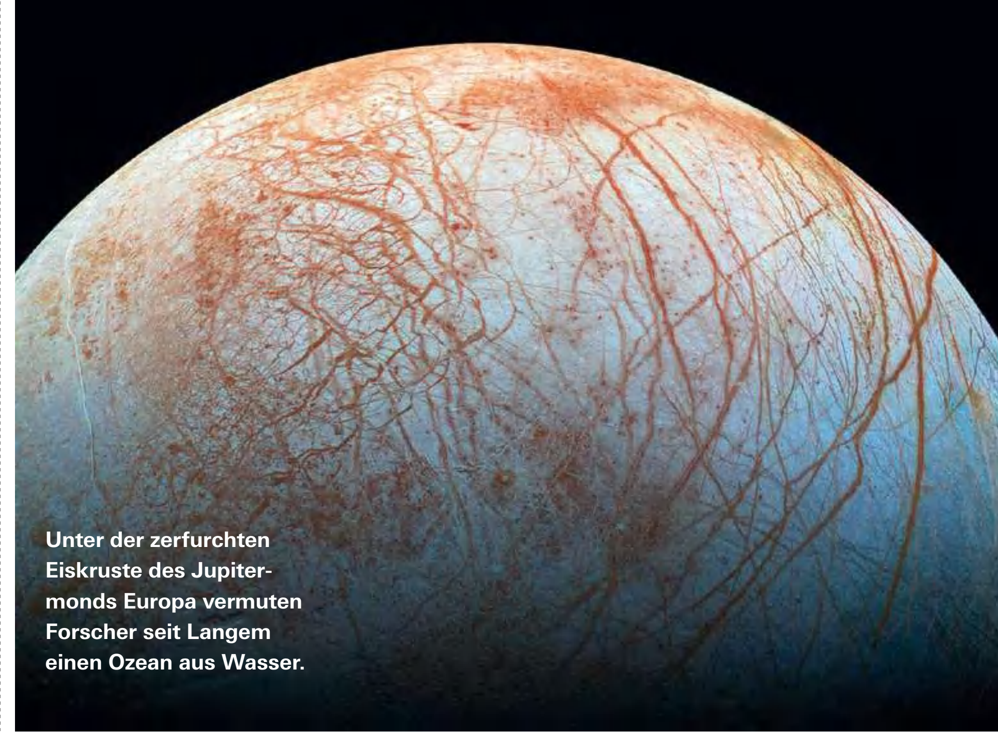
Schon länger vermuten Planetologen unter der Eiskruste des Jupitermonds Europa einen ausgedehnten Ozean. Dieser wird wahrscheinlich sowohl von Gezeitenkräften als auch von radioaktiven Zerfällen im Mantel erwärmt. Durch Konvektion und heiße Quellen am Meeresgrund müsste das Wasser also immer wieder in Bewegung geraten.

Christophe Gissinger und Ludovic Petitdemange vom französischen Forschungszentrum CNRS wollen nun eine neue, besonders mächtige Strömung unter der Eiskruste aufgespürt haben: Vermutlich umspannt sie wie ein riesiges Band den ganzen Himmelskörper, berichten die Forscher auf Basis von Computersimulationen.

Verantwortlich soll das Magnetfeld von Jupiter sein. Es reicht bis weit ins All hinaus und unterliegt periodischen Schwankungen. Dadurch müsste es elektrische Ströme in dem leitfähigen Salzwasser von Europas Ozean induzieren. Da die Ladungsverteilung nur mit einiger Verzögerung auf die Änderungen des Magnetfelds reagiert, wirkt auf das geladene Wasser die Lorentzkraft, die bewegte Ladungen senkrecht zu einem Magnetfeld umlenkt.

In den Simulationen der Forscher bildeten sich dadurch zum einen Turbulenzen nördlich und südlich des Äquators aus. Außerdem entstand die groß angelegte Strömung, die sich mit einigen Zentimetern pro Sekunde gen Westen bewegt. Sie müsste beträchtliche Kräfte auf den darüber liegenden Eispanzer ausüben, spekulieren die Forscher, womit sie einen Anteil an der zerfurchten Oberfläche des Trabanten haben könnte.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-019-0713-3, 2019



Unter der zerfurchten Eiskruste des Jupitermonds Europa vermuten Forscher seit Langem einen Ozean aus Wasser.

NASA/JPL-CALTECH/SETI INSTITUTE (PHOTOJOURNAL.JPL.NASA.GOV/CATALOG/PIA19048)

MEDIZIN
ZWILLINGE DER DRITTEN ART

Australische Forscher um Michael Gabbett von der Queensland University of Technology haben eine Zwischenform von eineiigen und zweieiigen Zwillingen entdeckt: Bei einer 28-jährigen Schwangeren besaßen die Föten zwar eine gemeinsame Plazenta, was normalerweise nur bei eineiigen, genetisch identischen Zwillingen der Fall ist. Später stellte sich jedoch heraus, dass die beiden Geschwister unterschiedliche Geschlechter haben.

Genauere Erbgutanalysen ergaben, dass die Zwillinge aus einer von zwei Spermien befruchteten Eizelle hervorgegangen sind. Die drei Chromosomensätze teilten sich dabei ungleichmäßig auf beide Geschwister auf, so dass sie das gleiche mütterliche Erbgut besitzen, aber nur 78 Prozent des väterlichen gemeinsam haben. Die Zwillinge sind somit weder monozygotisch (eineiig) noch dizygotisch (zweieiig), sondern sesquizygotisch.

Bereits im Jahr 2007 hatten Wissenschaftler einen ähnlichen Fall beobachtet. Offenbar kommt es immer wieder vor, dass zwei Spermien eine Eizelle befruchten. Normalerweise überleben die so entstehenden Embryonen mit drei Chromosomensätzen allerdings nicht. Doch in seltenen Fällen teilt sich die befruchtete Eizelle nicht in zwei, sondern in drei Zellen, von denen jede wie vorgesehen zwei Chromosomensätze besitzt: zwei Zellen mit mütterlichen Chromosomen und Genmaterial der Samenzellen sowie eine dritte mit den restlichen Chromosomen beider Spermien. Letztere wird jedoch schnell abgestoßen. Der heranwachsende Zellhaufen aus den beiden verbliebenen Zellen trennt sich dann zu den sesquizygoten Zwillingen auf.

New England Journal of Medicine 10.1056/NEJMoa1701313, 2019

4U4ME / GETTY IMAGES / ISTOCK

INSEKTENSTERBEN
BEUNRUHIGENDER SINKFLUG

Krefelder Forscher beobachteten über Jahrzehnte einen dramatischen Rückgang in der Biomasse von Fluginsekten. Andere Studien bestätigen die bedrohliche Situation – auch für die Bestäubung vieler Nutzpflanzen.


SEBASTIAN WIEDLING / UFZ

Josef Settele ist Agrarbiologe am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Halle sowie Professor für Ökologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Mitglied des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung - iDiv. Der Insekten- und Landnutzungsspezialist berät weltweit als Sachverständiger die Politik und wirkt in zentraler Funktion am Weltbiodiversitätsrat IPBES mit.

spektrum.de/artikel/1634738





Als Nutztiere sind Honigbienen nicht so unmittelbar vom Insektenschwund betroffen wie ihre natürlichen Verwandten. Doch auch sie leiden unter Umweltveränderungen, etwa einem zunehmenden Pestizideinsatz.

Etliche wissenschaftliche Studien warnen schon lange vor massiven Verlusten in der Pflanzen- und Tierwelt. Doch nur wenige von ihnen schaffen es, weltweit in die Schlagzeilen zu geraten. Zu diesen seltenen Ausnahmen zählt ein im Oktober 2017 veröffentlichter Beitrag, der über einen Rückgang der Biomasse fliegender Insekten um drei Viertel vor allem in Naturschutzgebieten Nordwestdeutschlands berichtete. Renommierte Fachzeitschriften wie »Nature« oder »Science« griffen die Studie auf, so dass sich schließlich auch Umweltschützer und Politiker darauf beriefen.

Die unter Federführung des niederländischen Ökologen Caspar Hallmann von der Radboud-Universität in Nimwegen erschienene Arbeit wird meist als »Krefelder Studie« bezeichnet, da sie auf Daten des Biologen Martin Sorg und seiner Kollegen vom Entomologischen Verein Krefeld aufbaut. Die Krefelder Insektenkundler sind Koautoren dieser bahnbrechenden Publikation und hatten bereits 2013 erste Ergebnisse veröffentlicht. Seit 1989 hatten sie an zahlreichen Standorten vor allem in Nordrhein-Westfalen so genannte Malaise-Fallen aufgebaut (siehe Fotos rechts unten). Die nach dem schwedischen Entomologen René Malaise (1892–1978) benannten zeltartigen Aufbauten sind so konstruiert, dass Insekten an einem Ende hineinfliegen, am anderen aber nicht mehr herauskommen. Sie bewegen sich darin dem Licht entgegen nach oben und landen dort in einem Behälter, wo sie in Alkohol konserviert werden. Die Fallen erfassen somit standardisiert Fluginsekten wie Fliegen, Mücken, Bienen, Wespen und Schmetterlinge.

Wenn man Insektenpopulationen betrachtet, gilt es zunächst zwei grundsätzlich verschiedene Ebenen auseinanderzuhalten, die mitunter gern vermischt werden: 1. Veränderungen in der Biomasse, also dem Gewicht aller Individuen einer Gruppe oder auch aller Insekten zusammen, und 2. Veränderungen bei der Artenzusammensetzung und der Häufigkeit einzelner Arten. Meist war in bisherigen Studien vor allem von Letzterem die Rede. Im Fokus standen Entwicklungen bestimmter Spezies innerhalb einer Insektengruppe, aus denen sich ermitteln ließ, inwieweit diese Arten an sich gefährdet sind und von welchen Schutzmaßnahmen sie profitieren. Dabei werden allerdings Populationsveränderungen bei den seltensten Spezies oft genauso stark gewichtet wie bei den häufigsten. Damit besteht die Gefahr, den Insektenrückgang insgesamt zu überschätzen, zumal generell seltenere Arten auch am stärksten zurückgegangen sind, während die häufigen – die den mit Abstand größten Beitrag zur Insektenbiomasse stellen – stabiler blieben.

Wir brauchen aber Angaben zur generellen Häufigkeit, um abzuschätzen, wie sich Veränderungen auf die Ökosysteme auswirken. So spielt für die Bestäubung und die biologische Schädlingsbekämpfung die Anzahl ausgewachsener Tiere, wie etwa von Bienen oder Schlupfwespen, eine entscheidende Rolle. Und wenn es um Nährstoffzyklen, die Zersetzung von organischem Material oder um die Nahrungsgrundlage Insekten fressender Tiere geht, benötigen wir sogar Daten zur Häufigkeit und somit zur Biomasse aller Entwicklungsstadien. Solche Analysen von Gesamtbiomassen fehlten bislang – eine ernsthafte Lücke auch angesichts der wirtschaftlichen Leistungen, die Insekten vollbringen: Weltweit werden fast 90 Prozent aller Blütenpflanzen – und 75 Prozent aller wichtigen Nutzpflanzen – von Insekten bestäubt. Insgesamt schätzt man den globalen Wert der Bestäubung für die Ernteerträge auf 200 bis 600 Milliarden Euro pro Jahr. Darüber hinaus sind 70 Prozent der Fledermaus- sowie 60 Prozent der Vogelarten auf Insekten als Futter angewiesen.


ALBERT VLIEGENTHART; MIT FRDL. GEN. VON JOSEF SETTELE UND ALBERT VLIEGENTHART

Da immer mehr Moorgebiete zuwachsen und damit als natürlicher Lebensraum verloren gehen, ist der Hochmoorgelbling *(Colias palaeno)* selten geworden. Außerdem setzt der Klimawandel der Schmetterlingsart zu.

AUF EINEN BLICK
DRAMATISCHER INSEKTENSCHWUND

1 Insekten spielen als Bestäuber eine zentrale Rolle in den Ökosystemen der Erde und sichern somit unsere Ernährung. Doch seit Jahrzehnten gehen weltweit die Bestände zurück – auch in Naturschutzgebieten.

2 Als Ursachen gelten: Verlust von Lebensräumen, strukturelle Verarmung von Wald-, Acker- und Gartenlandschaften, Einsatz von Düngern und Pestiziden sowie der Klimawandel.

3 Die Eindämmung der Risikofaktoren wäre ein Ausgangspunkt für eine Trendwende. Dieses Ziel lässt sich nur im gesamtgesellschaftlichen Konsens verfolgen, bei dem sich alle gemeinsam um Lösungen bemühen.

Diese Wissenslücke zur Gesamtbiomasse von Insekten zu schließen, ging die Krefelder Studie erstmals an, wenngleich sie ursprünglich gar nicht dafür geplant war. Neu an ihr war vor allem, dass sie sich über einen Zeitraum von 27 Jahren erstreckte. Bisher stützen sich relativ wenige Arbeiten zur Biomasse beziehungsweise zur Individuenzahl auf Beobachtungen von mehr als 15 Jahren.

Die Ergebnisse der Studie erschienen in zweierlei Hinsicht alarmierend: Die Krefelder Entomologen verzeichneten erschreckende Einbrüche in der Biomasse der Fluginsekten. Und diese Verluste traten ausgerechnet in Naturschutzgebieten auf – dabei sollten gerade solche Areale dem Erhalt der Natur dienen.

Es war bereits bekannt, dass in den letzten Jahrzehnten die Bestände an Insekten stärker schrumpften als bei einheimischen Pflanzen oder Vögeln. Doch der hier dokumentierte Rückgang übertraf um ein Vielfaches die Verluste, die bis dahin in vergleichbaren Zeiträumen in naturnahen Lebensräumen beobachtet worden waren. Die Biomasse der Fluginsekten verringerte sich im Schnitt um drei Viertel, wobei die schlimmsten Einbrüche in den Sommermonaten auftraten, wenn die meisten Sechsbeiner umherfliegen (siehe Grafiken »Insektenbiomasse in Deutschland«, S. 16). So ging beispielsweise im Schutzgebiet Orbroicher Bruch die binnen zwölf Monaten gesammelte Insektenbiomasse von anderthalb Kilogramm im Jahr 1989 auf unter 300 Gramm im Jahr 2013 zurück.

Am besten lässt sich die Situation bei Schmetterlingen einschätzen. Seit 2005 koordinieren wir am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) zusammen mit der Gesellschaft für Schmetterlingsschutz (GfS) das Tagfalter-Monitoring Deutschland (TMD) als bisher einziges systematisch betriebenes, langfristiges, deutsches Insektenbeobachtungsprogramm. Es handelt sich um ein so genanntes Citizen-Science-Projekt: Bürgerinnen und Bürger erfassen freiwillig Jahr für Jahr deutschlandweit bei wöchentlichen oder zweiwöchentlichen Begehungen entlang festgelegter Strecken alle Tagfalter. Die so entstehenden Bestandsdaten dokumentieren die Entwicklung der Tiere auf lokaler, regionaler sowie nationaler Ebene und lassen sich mit denen aus anderen europäischen Ländern vergleichen.

Wie geht es den Schmetterlingen in Europa?

Bei den Daten bis 2016 zeigte sich ein leichter, wenn auch nicht signifikanter Anstieg der Individuenzahlen. Da die Individuen der verschiedenen Falterspezies etwa gleich groß und schwer sind, dürfte sich hier die Entwicklung der Gesamtbiomasse widerspiegeln. Ähnliches beobachteten Schweizer Forscher für den Zeitraum 2003 bis 2016. Diese Daten scheinen der Krefeld-Studie zu widersprechen, die ab 2005 eine Abnahme der Insektenbiomasse um mehr als 40 Prozent feststellte. Gewichten wir hingegen die Trends aller Arten gleich und mitteln sie – als kombinierte Analyse aus Artenvielfalt und Häufigkeit –, so offenbart sich in diesem Zeitraum ein Rückgang der Tagfalter Deutschlands um elf Prozent. Das niederländische Tagfalter-Monitoring verzeichnete zwischen 1992 und 2016 hingegen einen Einbruch der Biomasse um 47 Prozent, wobei die Flächenanteile verschiedener Lebensräume berücksichtigt wurden.

Auf Basis der Tagfalter-Monitoring-Daten aus 22 Ländern erstellte ein internationales Team von Wissenschaftlern für die Europäische Umweltagentur in Kopenhagen den europäischen Schmetterlingsindikator für Grünland. In diesen Indikator flossen die Daten für 17 vorwiegend auf Wiesen und Weiden vorkommende Tagfalterarten ein. Demnach nahmen deren Bestände im Zeitraum von 1990 bis 2015 insgesamt um ein Drittel ab (siehe »Schmetterlinge in Europa«, S. 17).

Seit vielen Jahren führen so genannte Rote Listen gefährdete Pflanzen und Tiere auf. Dabei beurteilen Experten kurz- sowie langfristig die Entwicklung der Bestände; die

Eine Malaise-Falle besteht aus einem Zelt, in das Insekten zufällig hineinfliegen. Die Tiere versuchen dann, dem Licht entgegen nach oben zu entkommen – und gelangen in einen mit Alkohol gefüllten Behälter, wo sie konserviert werden. Die Fallen können an unterschiedlichen Standorten wie nährstoffreicheren Wiesen (oben) oder nährstoffarmen Heiden (unten) aufgestellt werden, um so verschiedene Habitate zu vergleichen.





resultierenden Einstufungen beruhen letztlich auf dem kollektiven Eindruck der entsprechenden Artenkenner – einer leider ebenfalls vom Aussterben bedrohten Spezies. Daraus ergibt sich ein umso fundierteres Bild, je beliebter die betreffende Insektengruppe ist.

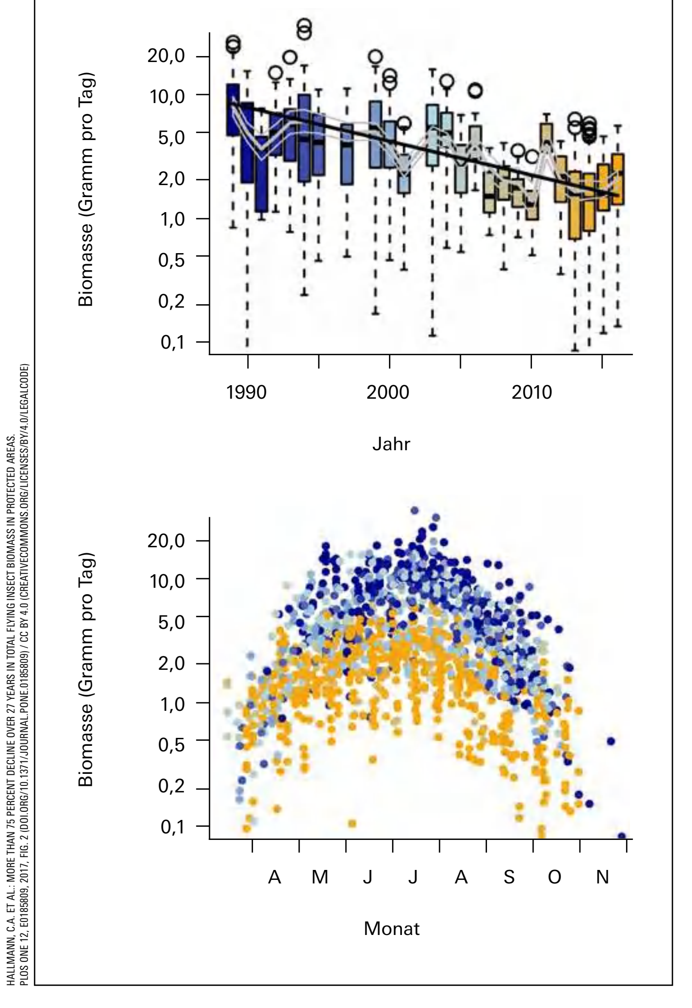
Die Einstufungen in den Roten Listen für den jeweiligen Bezugsraum – Region, Bundesland, Deutschland, Europa – erfolgt über standardisierte Kriterien. Dabei werden die Arten in Deutschland insgesamt zehn Kategorien zugeordnet und als rückläufig, zunehmend oder gleich bleibend zusammengefasst. Alle zehn Jahre erarbeiten zentrale Koordinatoren zusammen mit zahlreichen ehrenamtlichen Expertinnen und Experten unter Federführung des Bundesamts für Naturschutz die nationalen Roten Listen. Aus der aktuellen Fassung ergeben sich langfristige Bestandsentwicklungen von insgesamt 7444 Insektenarten über einen Zeitraum von bis zu 150 Jahren. Dabei nahmen 44 Prozent der Arten ab, 41 Prozent blieben gleich, und bei nur 2 Prozent war ein Zuwachs zu verzeichnen (siehe »Bestandsentwicklung von Insektenarten in Deutschland«, S. 21, obere Grafik).

Neben langfristigen Trends lassen sich auch kurzfristige abschätzen, die einen Zeitraum von 10 bis 25 Jahren umfassen. So zeigt sich bei Bienen und Tagfaltern, dass insbesondere seltene Spezies rückläufig sind, während es den häufigeren eher noch gut zu gehen scheint (siehe »Bestandsentwicklung von Insektenarten in Deutschland«, S. 21, untere Grafik). Kurz- und langfristige Trends zusammengefasst, müssen 42 Prozent der Insektenarten in Deutschland als bestandsgefährdet bewertet werden (Rote-Liste-Arten). Solange nur spärliche Studien vorliegen, die wirklich langfristige Zeitreihen auswerten, bleiben die Roten Listen nach wie vor das Hauptinstrument, um die Gefährdung von Arten einzuschätzen.

Eine der wenigen und zugleich richtungsweisenden Arbeiten zu langfristigen Entwicklungen von Artenbeständen stammt von Forschern um den Ökologen Jan Christian Habel von der Technischen Universität München. Die Wissenschaftler analysierten die Veränderungen von Tagfaltergemeinschaften eines Berghangs in Regensburg von 1840 bis 2013 – also über einen Zeitraum von fast zwei Jahrhunderten –, indem sie systematisch historische Quellen auswerteten. Dabei hat sich die Zusammensetzung der Falterarten stark gewandelt, und die Artenzahl nahm von 117 auf lediglich 71 ab. Betroffen waren vor allem so genannte Spezialisten, also Tiere, die besondere Ansprüche an den Lebensraum haben und oft nur ein eingeschränktes Nahrungsspektrum nutzen. Die meisten von ihnen gelten heute als gefährdet, während umgekehrt die Generalisten mit wenig spezialisierten Umweltansprüchen sogar zugenommen haben. Insbesondere Falterspezies, die sich kaum ausbreiten und nährstoffarme Habitate benötigen, erlitten gravierende Einbrüche.

Insektenbiomasse in Deutschland

Seit 1989 registrieren Forscher des Entomologischen Vereins Krefeld einen dramatischen Schwund an Insektenbiomasse (obere Grafik). Die Balken repräsentieren die Schwankungen der Messungen, die graue Linie gibt den Trend nach Berücksichtigung von Wetter-, Landschafts- und Habitateffekten wieder, die schwarze Linie stellt den Gesamttrend dar. Beachten Sie den logarithmischen Maßstab der y-Achse. Wie die untere Grafik zeigt, treten die Biomasseverluste besonders in den Sommermonaten auf (von blau, 1989, bis orange, 2016).



Kein Schutz in Schutzgebieten – selbst hier gehen die Insektenzahlen zurück

Da die Krefelder Entomologen ihre Messungen in geschützten Landschaften durchgeführt haben, stellen sich folgende Fragen: Erfüllen Schutzgebiete überhaupt noch die von ihnen erwartete Funktion? Und wie sieht die Entwicklung der Insektenbiomasse in nicht geschützten Ökosystemen aus? Mit den vorliegenden Daten der Studie lassen sie sich kaum beantworten. Dazu müssten wir wissen, welche Arten betroffen sind. Nur eine genauere Aufschlüsselung der Spezies samt ihrer ökologischen Ansprüche erlaubt differenzierte Aussagen. Auf Grund des hohen Aufwands war das den Forschern bislang nicht möglich.

Schmetterlinge in Europa

Der europäische Indikator für Tagfalter des Grünlands verzeichnet seit 1990 in 22 Ländern einen Rückgang der Populationsgrößen von 17 Schmetterlingsarten. Der graue Bereich symbolisiert die statistische Ungenauigkeit der berechneten Daten, die dunkelblaue Linie zeigt den Trend.

Populationsgröße (1990 = 100)
140
120
100
80
60
40
20
0
1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015
Jahr

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, EU COUNTRIES GRASSLAND BUTTERFLIES POPULATION INDEX (WWW.EEA.EUROPA.EU/DATA-AND-MAPS/DAVIZ/EUROPEAN-GRASSLAND-BUTTERFLY-INDICATOR-2#TAB-CHART_4) UND VAN SWAAY, C.A.M. ET AL.: THE EUROPEAN BUTTERFLY INDICATOR FOR GRASSLAND SPECIES: 1990-2015. REPORT VS2016.019. DE VLINDERSTICHTING, 2016

2019 veröffentlichten wir hierzu zusammen mit Stanislav Rada, der inzwischen an der tschechischen Universität Olmütz forscht, eine eigene Studie. Dabei stellten wir – erwartungsgemäß – fest: Tagfalter weisen in deutschen Schutzgebieten des Natura-2000-Netzwerks einen höheren Artenreichtum auf als außerhalb. Ebenfalls erwartungsgemäß nimmt dieser Reichtum mit dem Abstand von solchen Gebieten ab. Allerdings zeigten die mit den Daten des Tagfalter-Monitorings kombinierten Auswertungen auch, dass die Artenvielfalt binnen elf Jahren um zehn Prozent zurückging – und zwar jenseits der Naturschutzgebiete genauso wie innerhalb. Demnach waren die Areale nicht in der Lage, den generellen Trend aufzuhalten. Oder anders formuliert: Die Rückgänge in den Naturschutzgebieten spiegelten die Gesamtentwicklung wider. Der Unterschied bestand nur darin, dass die Schutzgebiete einen höheren Artenreichtum aufwiesen als außerhalb.

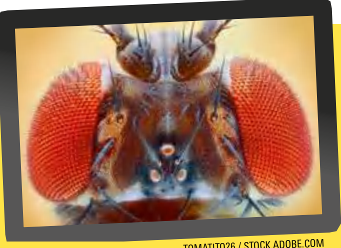
Es erscheint also plausibel, dass die in der Krefelder Studie festgestellte Abnahme durchaus repräsentativ für großräumige Landschaften sein könnte. Es handelt sich dabei jedoch um Biomassen, während unsere Studie die Artenzahlen betrachtet. Wenn aber Insekten in Schutzgebieten schon auf einem niedrigen Niveau von Biomasse oder Artenvielfalt angelangt sind, dürfte die Situation in der ungeschützten Umgebung noch schlechter aussehen!

Warum verschwinden unsere Insekten? Grundsätzlich lassen sich Phänomene eines globalen Wandels schwer nach ihren Ursachen aufschlüsseln. Die Krefelder Entomologen haben einige mögliche Gründe untersucht, beispielsweise Veränderungen in Niederschlag, Temperatur oder Pflanzenbedeckung. Dabei handelt es sich um Korrelationen, die jedoch nicht unbedingt kausale Zusammenhänge beschreiben. Zudem lassen sich nur Faktoren analysieren, für die entsprechende Daten vorliegen. Da solche etwa zu Details der Landnutzung wie Pestizid- oder Düngemitteleinsatz fehlen, sind kaum gesicherte Aussagen möglich, wenngleich derartige Einflüsse sehr wahrscheinlich sein dürften.

Auch wenn es somit schwierig sein mag, den beobachteten Insektenschwund auf eindeutige Ursachen zurückzuführen, gibt es durchaus wissenschaftliche Erkenntnisse zum Thema. So wertete der Weltbiodiversitätsrat (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES) tausende dem wissenschaftlichen Peer-Review unterzogene Studien zur Lage bestäubender Insekten aus, um wesentliche Gefährdungsfaktoren

Mehr Wissen auf Spektrum.de

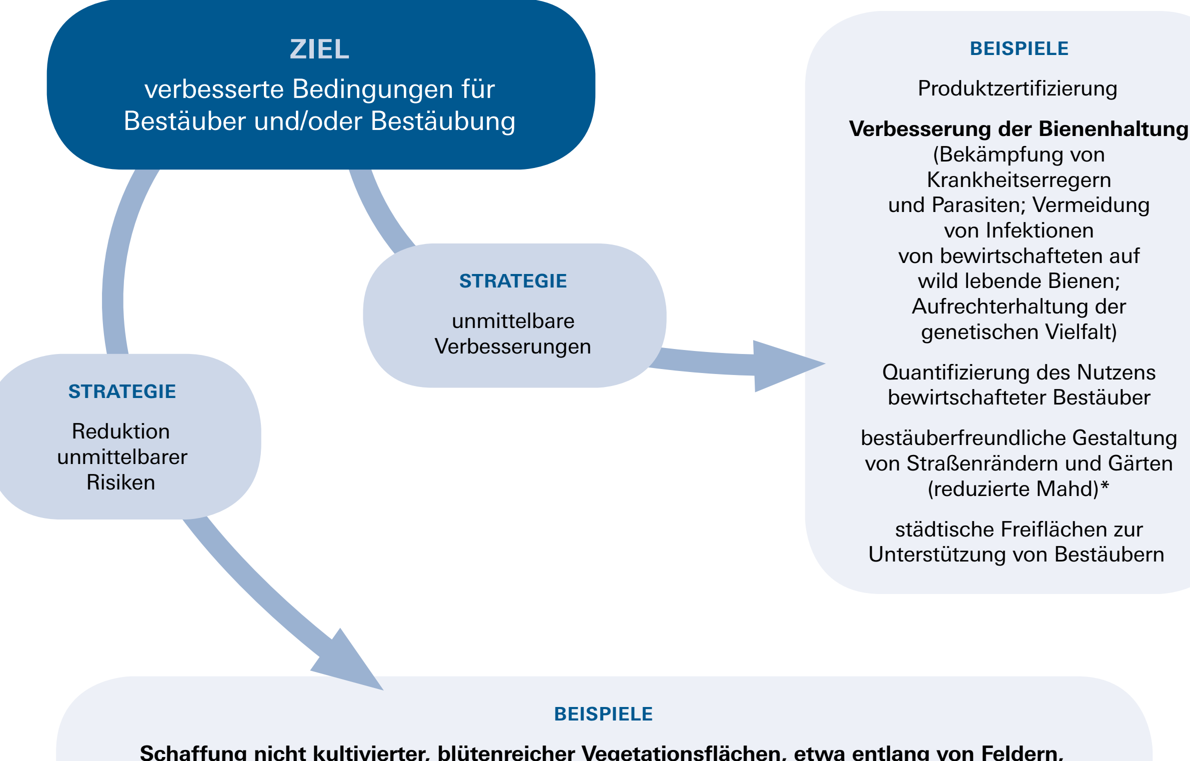
Was Sie selbst gegen den Insektenschwund tun können, erfahren Sie unter **spektrum.de/artikel/1635420**



TOMATITO26 / STOCK.ADOBE.COM

Empfehlungen des Weltbiodiversitätsrats zur Förderung bestäubender Insekten

Der Weltbiodiversitätsrat IPBES hat einen Maßnahmenkatalog zusammengestellt, der die Bedrohung von bestäubenden Insekten wie Bienen eindämmen soll. Von der Bestäubung hängt unsere Nahrungsmittelproduktion und damit letztlich unsere Lebensgrundlage ab. Die fett gedruckten Maßnahmen werden bereits in einigen Teilen der Welt umgesetzt und zeigen einen wissenschaftlich belegten Nutzen für Bestäuber. Die mit * markierten Handlungsempfehlungen könnten neben positiven auch negative Auswirkungen haben.



BEISPIELE

Schaffung nicht kultivierter, blütenreicher Vegetationsflächen, etwa entlang von Feldern, die über die gesamte Vegetationsperiode hinweg Nektar und Pollen bereitstellen

zeitliche Staffelung blühender Kulturpflanzen (kleinteiligere Bewirtschaftung; unterschiedliche Kulturarten; Erweiterung der Fruchtfolgen; Verwendung früh, mittel und spät blühender Kulturarten)*

extensivierte Grünlandnutzung (reduzierte Mahd/Düngung; geringere Besatzdichte bei Beweidung)

Förderung bestäuberfreundlicher Praktiken

Information der Landwirte über die Rolle der Bestäubung

höhere Standards bei der Risikobewertung von Pestiziden und genetisch veränderten Organismen

Förderung von Technologien und landwirtschaftlichen Praktiken, um die von Pestiziden ausgehenden Gefahren für Bestäuber zu verringern

Vermeidung von Infektionsrisiken und Krankheitsbekämpfung bei Bestäubern

Verringerung des Pestizideinsatzes (integrierter Pflanzenschutz)

nach Potts, S. G. et al. (Hg.): The assessment report on pollinators, pollination and food production. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2016

ZIEL
Transformation von Agrarlandschaften

STRATEGIE
ökologische Intensivierung der Landwirtschaft durch aktives Management von Ökosystem-leistungen

BEISPIELE

Förderung diversifizierter Anbausysteme

Förderung von Direktsaatverfahren

Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel (Auswahl von trockenresistenten Kultursorten)

politische Beteiligung von Landwirten und Gemeinden bei Planung, Gestaltung und Nutzung von Landschaften (partizipatives Management; in Deutschland bereits häufige Praxis)

Förderung des integrierten Pflanzenschutzes

Bewertung von Bestäubungsleistungen für landwirtschaftliche Betriebe

Förderung von bestäuber- und bestäubungsfreundlichen Nutzungssystemen

Entwicklung von Märkten für alternative Bestäuberarten

Unterstützung traditioneller Fruchtfolgen (höherer Anteil an Nektar bietenden Blütenpflanzen) und kleinräumiger Vielfalt von Lebensräumen; Zusammenarbeit von lokalen Wissensträgern mit anderen Akteuren

STRATEGIE
Stärkung bereits existierender diversifizierter Anbausysteme

BEISPIELE

Förderung von Bioanbau und Nahrungsmittel-sicherheit

Förderung biokultureller Schutzansätze (traditionelle Nutzungsformen)

STRATEGIE
Investitionen in ökologische Infrastruktur

BEISPIELE

Wiederherstellung naturnaher Lebensräume (auch in Städten)

Schutz von Naturerbestätten und traditionellen Anbaupraktiken

Lebensraumverbund (Verbindung isolierter Lebensräume)

großräumige Landnutzungsplanung für eine strukturelle und biokulturelle Vielfalt von Lebensräumen

ZIEL
Verbesserung der Beziehung der Gesellschaft zur Natur

STRATEGIE
Integration vielfältiger Wissensformen und Werte in Bewirtschaftung und Management

BEISPIELE

Integration der Ergebnisse aus Bestäuberforschung in landwirtschaftliche Praxis

Informationsaustausch zwischen lokalen Wissensträgern, Wissenschaftlern und weiteren Akteuren

Stärkung des lokalen Wissens über Bestäuber und Bestäubung

Einbeziehung der vielfältigen soziokulturellen Werte von bestäubenden Tierarten

STRATEGIE
Verbindung von Menschen und Bestäubern

BEISPIELE

Beobachtung von Bestäubern

Verbesserung taxonomischer Kenntnisse durch Bildung, Schulung und neue Techniken

Informationsprogramme etwa für Entscheidungsträger, Öffentlichkeit und Medien

Management von städtischen Räumen für Bestäuber (»Bürgergärten«, »Biene sucht Blüte«, »Deutschland summt«)

Entwicklung, Verbreitung und Unterstützung gesellschaftlich und politisch sichtbarer Initiativen und Strategien zur Unterstützung der Bestäubung

herauszustellen. Diese eröffnen zugleich Verbesserungschancen – nicht nur für die Bestäuber, sondern generell für Insekten. Hierzu analysierte eine internationale Fachgruppe von annähernd 100 Expertinnen und Experten, unterstützt durch die Zuarbeit hunderter weiterer Fachleute von etlichen Forschungseinrichtungen, privaten Unternehmen sowie Nichtregierungsorganisationen, den Kenntnisstand über Bestäubung und Nahrungsmittelproduktion.

Die zahlreichen Freilandstudien legen den Schluss nahe, dass die intensive Landwirtschaft die Anzahl, Vielfalt und Gesundheit der Insekten und damit deren Bestäubungsleistung bedroht. In den gemäßigten Breiten Mitteleuropas stellt Landwirtschaft seit jeher einen massiven Einflussfaktor dar. Viele Tier- und Pflanzenarten haben sich an unsere Kulturlandschaften angepasst; manche wurden erst über die Forst- und Landwirtschaft bei uns heimisch. Ändert sich die Nutzung entweder durch Intensivierung oder auch durch Nutzungsaufgabe, geschieht das auf Kosten der Vielfalt in diesen Landschaften.

So ist der heutige Ackerbau durch großflächige, artenarme Monokulturen geprägt, in denen Wildkräuter zurückgedrängt werden – hier können nur wenige Insektenarten überleben. Eine häufigere und intensivere Mahd sowie wiederholtes Umpflügen beeinträchtigen die Tierwelt ebenfalls. Zusätzlich werden durch Siedlungs- und Straßenbau immer mehr Lebensräume zerstört. Naturschutzgebiete erstrecken sich meist über kleine Flächen, die inselartig von Nutzland umgeben sind. Den Insektenpopulationen fehlt durch diese Isolierung der genetische Austausch.

In der Landwirtschaft eingesetzte Pestizide und ihre Abbauprodukte reichern sich im Boden und in den Gewässern an. Besonders umstritten sind die so genannten Neonikotinoide, die gegen Schädlinge verabreicht werden, aber auch das Nervensystem von Bienen beeinträchtigen. 2018 untersagte die EU-Kommission die Nutzung dreier dieser Insektizide. Durch intensive Düngung sowie durch Autoabgase aus der Luft gelangt außerdem vermehrt Stickstoff in die Böden. Das beeinflusst wiederum Schmetterlingsraupen, die bevorzugt auf Pflanzen leben, die weniger Stickstoff brauchen.

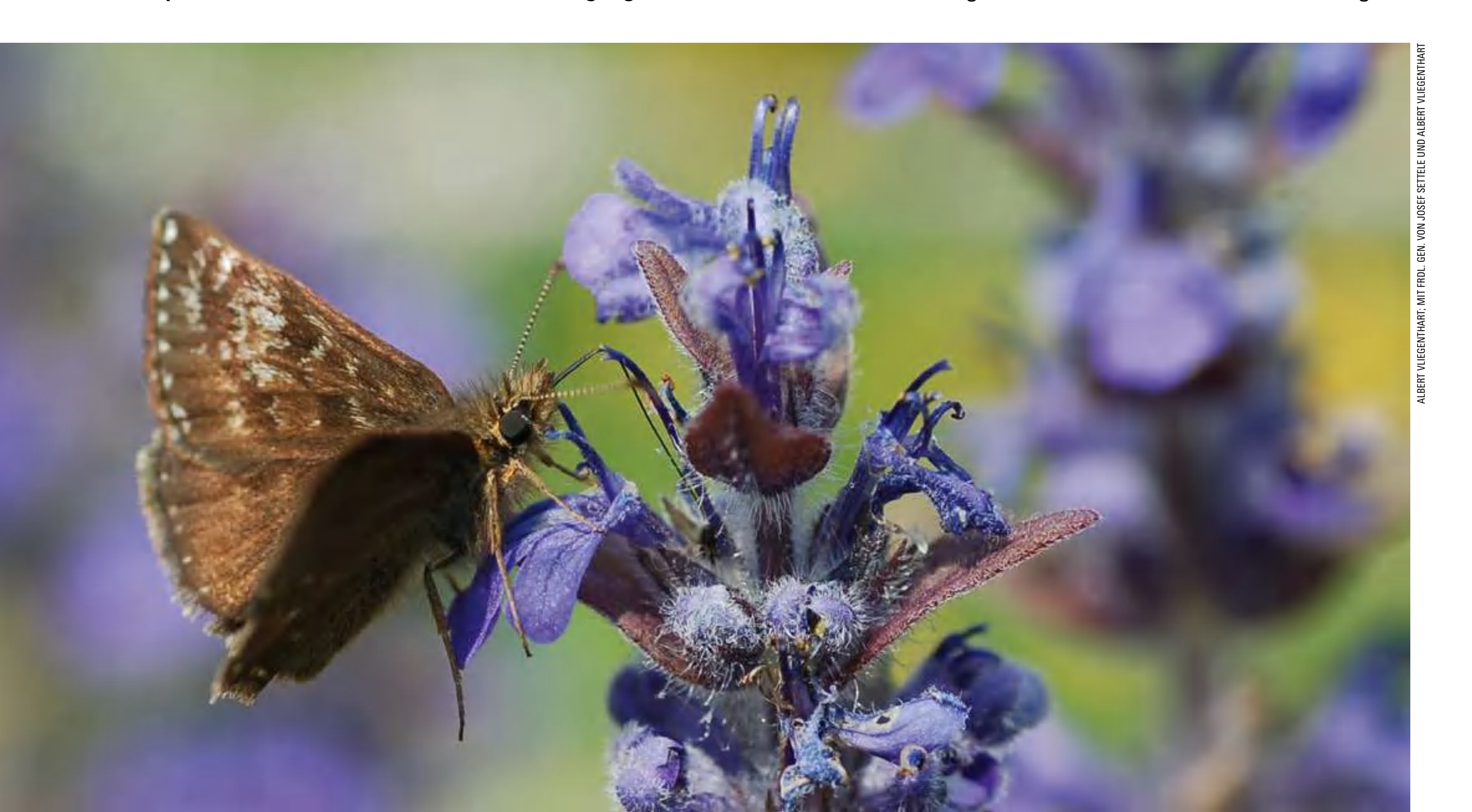
Biologische Faktoren spielen ebenfalls eine Rolle. Honigbienen werden von eingeschleppten Parasiten wie der Varroamilbe befallen. Neue Pflanzen, die nach Europa eingeschleppt werden und sich hier ausbreiten, können Arten verdrängen, die für heimische Insekten beziehungsweise deren Larvenstadien überlebensnotwendig sind.

Wir wissen genug, um zu handeln

In Zukunft dürfte zudem der Klimawandel ein immer schwerwiegenderes Problem darstellen, denn die sich verschlechternden klimatischen Bedingungen werden den Artenschwund noch forcieren. Von höheren Temperaturen sollte die Insektenwelt zwar eigentlich profitieren. Die zunehmende Wärme kann allerdings auch in Kombination mit einem erhöhten Stickstoffeintrag zu einer dichteren Vegetation führen, womit sich wiederum das Mikroklima abkühlt. Das vermag klimatische Effekte zu kaschieren.

Die zahlreichen Umweltfaktoren können sich in ihren negativen Folgen auch gegenseitig verstärken. Letztlich wird es uns nicht gelingen, alle Ursachen lückenlos zu belegen und näher einzugrenzen. Aber allein um weiteren Verschlechterungen vorzubeugen, wäre es wichtig, plausibel erscheinenden Ursachen für das Insektensterben entgegenzuwirken.

Der IPBES-Bericht empfiehlt Strategien, um die Lebensbedingungen von Bestäubern und somit von vielen weiteren Insekten zu verbessern – und dadurch letztlich auch unsere Nahrungsmittelproduktion zu sichern! Die Liste reicht von sofortigen Maßnahmen zur Risikoreduzierung bis

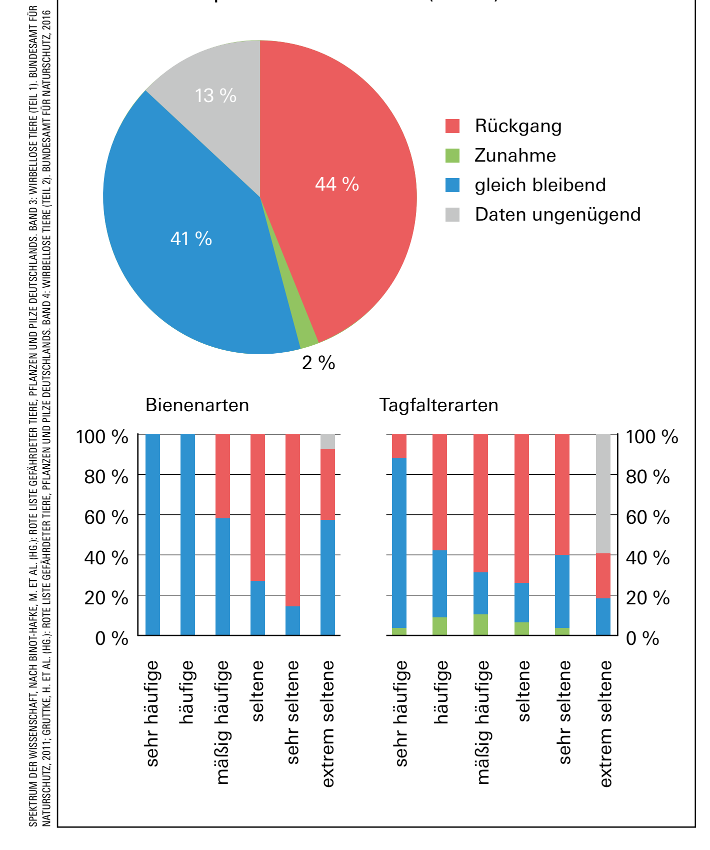


Der Dunkle Dickkopffalter *(Erynnis tages)* lebt im trockenen Grünland. Noch ist die Art verbreitet, manche Populationen verzeichnen aber bereits Rückgänge.

ALBERT VLIEGENTHART; MIT FRDL. GEN. VON JOSEF SETTELE UND ALBERT VLIEGENTHART

Bestandsentwicklung von Insektenarten in Deutschland

Die Roten Listen des Bundesamts für Naturschutz liefern langfristige Bestandsentwicklungen von 7444 Insektenarten in Deutschland. Demnach nahm fast die Hälfte der Arten ab (oben). Kurzfristige Trends über 10 bis 25 Jahre bei 569 Bienen- und 189 Tagfalterarten zeigen, dass vor allem die seltenen Spezies bedroht sind (unten).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH BINOT-HAFKE, M. ET AL. (HG.): ROTE LISTE GEFÄHRDETER TIERE, PFLANZEN UND PILZE DEUTSCHLANDS. BAND 3: WIRBELLOSE TIERE (TEIL 1). BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, 2011; GRUTTKE, H. ET AL. (HG.): ROTE LISTE GEFÄHRDETER TIERE, PFLANZEN UND PILZE DEUTSCHLANDS. BAND 4: WIRBELLOSE TIERE (TEIL 2). BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ, 2016

hin zu umfassenden und langfristigen Umwandlungsprozessen in der Landnutzung. Zu nennen wären hier beispielsweise Blühstreifen entlang der Ackerflächen, die Nektar für Insekten bereitstellen, oder die Förderung von diversifizierten Anbaumethoden, um Monokulturen einzudämmen. Wiederhergestellte naturnahe Lebensräume auch in den Städten helfen unseren Kerbtieren ebenfalls (siehe »Empfehlungen des Weltbiodiversitätsrats zur Förderung bestäubender Insekten«, S. 18/19).

Die wenigen langfristigen Studien, die wir haben, zeigen, wie wertvoll es ist, Insekten über Zeiträume von mehr als zehn Jahren systematisch und wiederholt zu erfassen. Nur dadurch erhalten wir zuverlässige Aussagen zu allmählichen Entwicklungen und können wesentliche Ursachen dieser Trends sowie deren Auswirkungen auf die Ökosysteme analysieren.

Die große Mehrzahl unserer Erkenntnisse über den Insektenschwund – sei es durch behördlich koordinierte Bestandsabschätzungen wie die Roten Listen, sei es durch die Krefelder Studie oder das Tagfalter-Monitoring – gehen auf das Engagement vieler ehrenamtlich tätiger Insektenkundler zurück. Seit jeher ist die Expertise für Insekten im Ehrenamt verankert und wird nur durch wenige professionelle Entomologen ergänzt – wobei »professionell« lediglich den Sachverhalt beschreibt, dass diese Experten das Glück haben, für ihre Arbeit bezahlt zu werden. Umso ärgerlicher war es, als die Krefelder Kollegen anfangs als »Hobbyforscher« diskreditiert wurden, deren Ergebnisse »zweifelhaft« seien. Abgesehen davon, dass mehr als ein Drittel der Vereinsmitglieder einen naturwissenschaftlichen Universitätsabschluss besitzen, schätze ich aus eigener Erfahrung mit Citizen-Science-Projekten wie dem Tagfalter-Monitoring sehr viele ehrenamtliche Akteure als ausgewiesene Experten. Ohne deren Wissen und Engagement wüssten wir fast nichts über unsere heimische Flora und Fauna.

Die Arbeit der ehrenamtlichen Experten muss fortgesetzt werden, um so ein dringend notwendiges, standardisiertes Monitoring zu etablieren. Die »Bürgerwissenschaftler« brauchen dafür jedoch auch die Unterstützung durch wissenschaftliches Fachpersonal – finanziert mit öffentlichen Geldern. Denn das Ehrenamt stößt etwa bei komplexen Auswertungen an seine Grenzen.

Der Insektenschutz betrifft die Landwirtschaft genauso wie den Forst, die Gestaltung urbaner Bereiche, die Landschafts- und Umweltplanung sowie nicht zuletzt die Nutzung des eigenen Gartens oder Balkons – also uns alle! Einheimische Kräuter statt exotischer Zierpflanzen bieten reichlich Nektar für Wildbienen. Die Tiere freuen sich auch über Nisthilfen, die man kaufen oder leicht selbst bauen kann. Wer im Garten Brennnesseln oder andere »Unkräuter« stehen lässt, tut damit dem Nachwuchs von Schmetterlingen einen Gefallen. Und gerade Hobbygärtner sollten sich gut überlegen, ob sie wirklich chemische Schädlingsbekämpfungsmittel verwenden müssen.

Es geht nicht darum, bestimmte gesellschaftliche Akteure wie Landwirte als Alleinverantwortliche an den Pranger zu stellen. Jeder kann seinen Beitrag leisten und sich für den Erhalt der Insekten einsetzen, um so einem drohenden ökologischen Kollaps Einhalt zu gebieten. Wenn es dabei noch gelingt, die zahlreichen Aktivitäten in Deutschland zu vernetzen – auch auf Seiten der zuständigen Bundesministerien –, sollte es möglich sein, den Trend zu stoppen und sogar umzukehren. ◂

QUELLEN

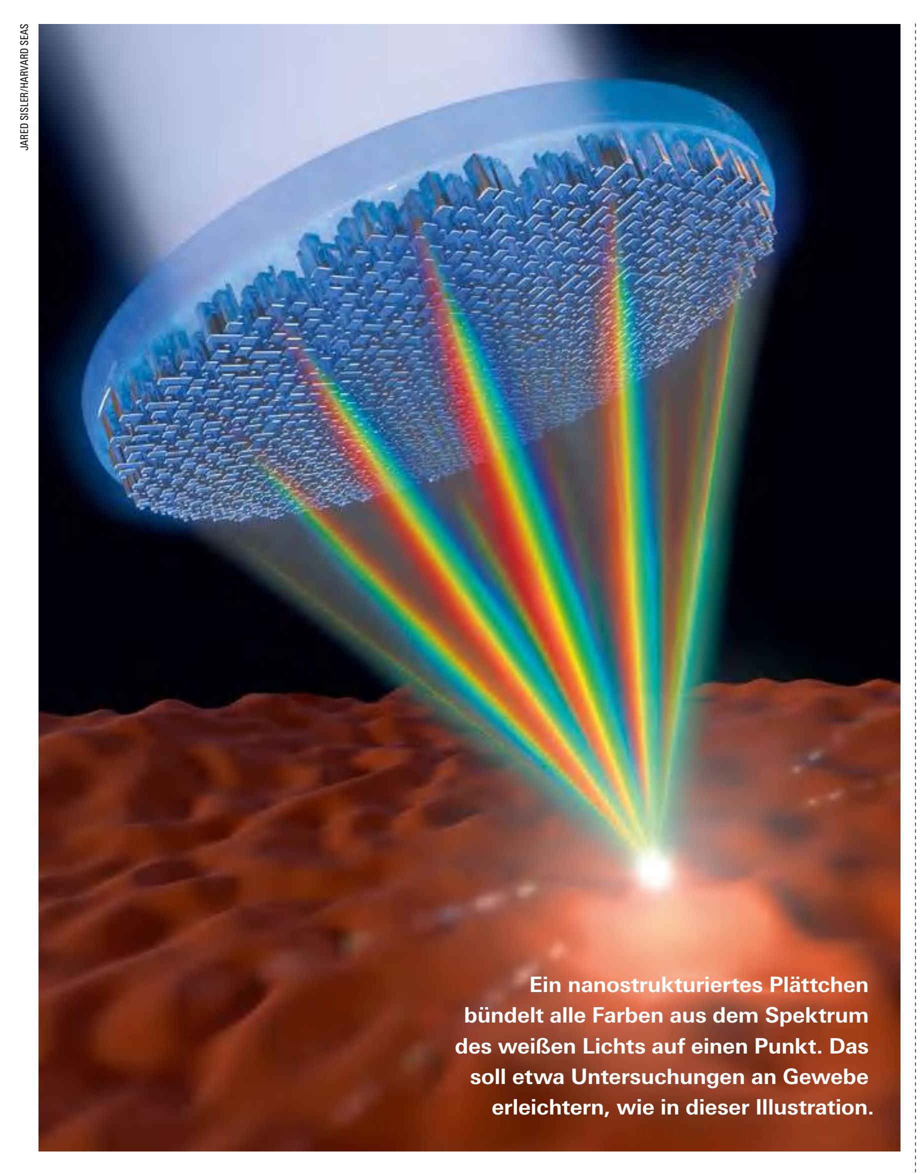
Habel, J.C. et al.: Butterfly community shifts over two centuries. Conservation Biology 30, 2016

Hallmann, C.A. et al.: More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. PLoS One 12, e0185809, 2017

Rada, S. et al.: Protected areas do not mitigate biodiversity declines: a case study on butterflies. Diversity and Distributions 25, 2019

Sorg, M. et al.: Ermittlung der Biomassen flugaktiver Insekten im Naturschutzgebiet Orbroicher Bruch mit Malaise-Fallen in den Jahren 1989 und 2013. Mitteilungen aus dem Entomologischen Verein Krefeld 2013/1

JARED SISLER/HARVARD SEAS



Ein nanostrukturiertes Plättchen bündelt alle Farben aus dem Spektrum des weißen Lichts auf einen Punkt. Das soll etwa Untersuchungen an Gewebe erleichtern, wie in dieser Illustration.

OPTIK

PAPIERDÜNNE LINSEN DANK NANOSTRUKTUREN

Physiker wollen herkömmlichen Glaslinsen mit 1000-mal flacheren Bauteilen Konkurrenz machen. Nun funktioniert eine solche »Metalinse« erstmals mit dem größten Teil des sichtbaren Lichts und unabhängig von dessen Schwingungsrichtung.

Im frühen 19. Jahrhundert waren Linsen in Teleskopen und sonstigen optischen Instrumenten bereits verbreitet, doch um das Licht von Leuchttürmen effizient hinaus aufs Meer zu bündeln, wären die dafür nötigen riesigen Glaslinsen zu schwer gewesen. Der französische Physiker Augustin Jean Fresnel erkannte jedoch, dass Licht erst beim Übergang von einem Medium ins andere gebrochen wird. In seinen Plänen schnitt er deswegen das entbehrliche Material in der Mitte einer Linse scheibenweise heraus und ließ nur die gekrümmten Oberflächen stehen (siehe »Aus rund mach flach«, rechts). Die Erfindung funktionierte, und Seefahrer konnten das Leuchtfeuer weiter vor der Küste erkennen als je zuvor.

Noch heute leiten Linsen nach Fresnels Prinzip die Helligkeit einer nahen Quelle gezielt in die Ferne: Ihre typische Rillenstruktur findet sich beispielsweise im transparenten Plastik jedes Fahrzeugscheinwerfers. Derlei Bauteile lassen sich jedoch nur dann sinnvoll anwenden, wenn es eher auf die Intensität und weniger auf die Qualität der Abbildung ankommt. Sie können hochwertige normale Linsen nicht generell ersetzen, denn ihre mehrfach durch steile Kanten unterbrochene Oberfläche streut Teile des Lichts auf störende Weise.

Rund 200 Jahre nach Fresnel sollen flache Linsen nach dem Willen einiger Forscher nun doch noch klassischen Glasoptiken Konkurrenz machen. Mit einem Trick lassen sich die Stufen völlig entfernen, die Linse wird einheitlich flach – und trotzdem beeinflusst die Oberfläche das Licht so, als wäre sie gekrümmt. Der paradoxe Kniff gelingt den Physikern, indem sie an ein anderes Vermächtnis Fresnels anknüpfen: die Wellennatur des Lichts, zu deren Enthüllung der Franzose ebenfalls maßgeblich beitrug.

Die Wissenschaftler platzieren nämlich Rillen und Säulen auf der Oberfläche, die nur wenige zehn bis hunderte Nanometer dünn sind. Derart schmale Strukturen fangen die einzelnen Wellen des Lichts gewissermaßen zwischen sich ein und führen sie durch das Medium. Die individuellen Elemente unterscheiden sich leicht voneinander. Dadurch halten einige Abschnitte das Licht länger gefangen und verzögern seine Ausbreitung stärker. So tritt es an manchen Stellen früher wieder aus, an anderen später. Die Lichtwellen überlagern sich daraufhin zu einer neuen Front, die in einer bestimmten Richtung schräg aus der Oberfläche herausläuft – obwohl diese eigentlich flach ist. Hinter einer solchen »Metalinse« breitet sich das Licht also letztlich aus wie die Strahlen bei einer herkömmlichen Linse.

In technischen Anwendungen könnte das eine ungeahnt kompakte und leichte Bauweise bei optischen Geräten ermöglichen. Die entscheidenden Elemente solcher Linsen in lichtdurchlässigen Halbleitern wie Titandioxid sind kaum einen Mikrometer (tausendstel Millimeter) dick.

Zwar gelang es Forschern bereits vor Jahrzehnten, Strahlung mittels spezieller Oberflächenstrukturen zu bündeln, sogar im sichtbaren Spektrum. Aber der Effekt hängt stark von der Wellenlänge ab: Jede Farbe fällt in einen eigenen Winkel. Die vielen Wellenlängen des weißen Lichts ließen sich nicht auf einen Punkt zusammenführen. Nun ist Wissenschaftlern das Kunststück jedoch mit raffiniert im Computer berechneten Nanostrukturen gelungen.

Ein Ort, sie zu bündeln

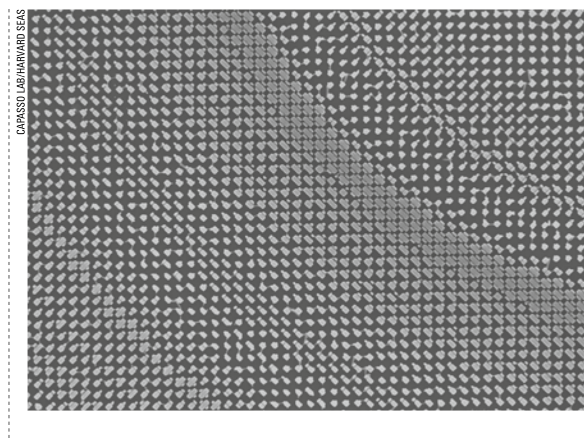
Den Erfolg verbuchte eine US-Arbeitsgruppe um Federico Capasso von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. Die Wissenschaftler konstruieren bereits seit einigen Jahren gezielt Metalinsen im Bereich sichtbarer Wellenlängen. Schon 2016 haben sie leistungsfähige Exemplare jeweils speziell für den roten, grünen und blauen Teil des Spektrums gefertigt. Die Abbildungsqualität bei den entsprechenden Wellenlängen erwies sich der eines herkömmlichen Glasobjektivs für Mikroskope als ebenbürtig. Seinerzeit gelang es den Forschern allerdings noch nicht, die verschiedenen Wellenlängen mit einer einzelnen Linse auf einen Punkt zu fokussieren. Das holten sie in zwei Publikationen vom Januar 2018 nach. Mit ausgeklügelten Designs der Nanostrukturen erzeugten sie eine gemeinsame Brennweite für Wellenlängen zwischen 470 und 670 beziehungsweise zwischen 400 und 660 Nanometern. Das funktionierte indes nur mit polarisiertem Licht, also solchem mit einer bestimmten Schwingungsrichtung. Normales Umgebungslicht hat aber keine Vorzugsorientierung, so dass die Linse bloß auf einen Teil davon wirkt.

Den jüngsten Durchbruch erreichte im Januar 2019 Wei Ting Chen aus Capassos Arbeitsgruppe. Er präsentierte erstmals eine Metalinse, die Licht unabhängig von dessen Polarisationsrichtung und über fast den ganzen Bereich des sichtbaren Spektrums fokussiert.

Chen hatte eine geschickte Anordnung verschiedener Strukturen mit rechteckiger Grundfläche errechnet und die Linse mittels Elektronenstrahllithografie hergestellt. Dabei fräst ein dünner Strahl aus Elektronen Furchen in eine Halbleiterschicht. Die Wissenschaftler hoffen jedoch, solche Linsen in Zukunft auch mit der auf Licht basierenden Fotolithografie – einer etablierten Methode aus der Massenproduktion von Computerchips – im großen Stil zu fertigen.

Werden nun Metalinsen bald die Linsen in Smartphonekameras und weiteren miniaturisierten Geräten ersetzen? Darauf spekuliert zumindest Capassos Arbeitsgruppe, die seit 2017 mit einer ausgegründeten Firma und mehreren Patenten eine Kommerzialisierung vorantreibt. Ein Problem ist allerdings derzeit noch die Winzigkeit der Bauteile. Chens polarisations- und wellenlängenunabhängiges Exemplar bringt es auf gerade einmal 26 Mikrometer Durchmesser. Die Linsen in Smartphones sind 100-mal größer.

Auf dem Weg zu entsprechend dimensionierten Metalinsen gibt es diverse Hürden. Beispielsweise sind darauf schlicht mehr Nanostrukturen nötig. Deren Zahl wächst mit dem Quadrat der Fläche, und millimeter- oder gar zentimetergroße Linsen brauchen Milliarden von Elementen. Jedes muss berechnet und mittels Lithografie in die Oberfläche geritzt werden. Von Capassos Team entwickelte Kompressionsalgorithmen



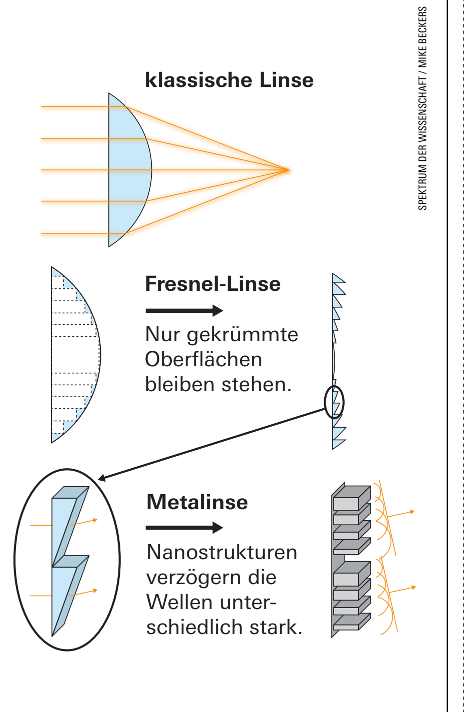
CAPASSO LAB/HARVARD SEAS

Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines etwa 20 Mikrometer breiten Bereichs einer Metalinse zeigt die typische Struktur der Oberfläche.

Aus rund mach flach

Eine klassische Linse bündelt Licht mittels ihrer gekrümmten Oberflächen (oben). Bleiben nur diese stehen und entfernt man die inneren Glasschichten, ergibt sich eine viel dünnere Fresnel-Linse (Mitte). Sie bricht das Licht ähnlich, doch die Sägezahnstruktur ermöglicht keine gute Abbildung mehr.

In mikroskopischen Dimensionen lassen sich die Stufen durch einzelne, unterschiedlich breite Nanoblöcke ersetzen (unten). Bei einer solchen »Metalinse« verzögern die Strukturen die Wellen des Lichts gerade so, dass es in eine bestimmte Richtung gebündelt wird.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

nutzen bereits gewisse Symmetrien, um den Prozess zu vereinfachen und handhabbar zu machen.

Ein zweites Problem ist subtiler: Wellen, die von der Mitte der Linse zum Fokuspunkt laufen, haben rein geometrisch einen kürzeren Weg dorthin als solche, die vom Rand kommen. Eine Lichtfront, die auf der Vorderseite einfällt, erreicht den Sammelpunkt dahinter also nicht gleichzeitig, sondern in Form kleiner Pakete, bei denen die Berge und Täler der Wellen nicht mehr genau übereinanderliegen. Statt sich wieder auf die ursprüngliche Intensität zu verstärken, löschen sich einige nun gegenseitig aus.

Der Wald von Nanosäulen will nicht wachsen

Um den Effekt auszugleichen, müssen die Strukturen zusätzlich das Licht zwischen den äußersten Bereichen bis zur Mitte insgesamt gerade passend verzögern. Das können die Wissenschaftler aber nur in gewissen Grenzen über die Oberflächeneigenschaften steuern. Der naheliegendste Weg wäre, die Metalinsen schlicht dicker zu machen – mehr zu durchquerendes Material bedeutet eine größere mögliche Gesamtverzögerung.

Allerdings ist es schwierig, die feingliedrigen Säulen immer weiter in die Höhe wachsen zu lassen. Die Physiker um Capasso erreichen mittels Elektronenstrahllithografie 600 Nanometer. Dänische Nanowissenschaftler haben 2016 mit einem neuen Verfahren und dem gleichen Werkstoff (Titandioxid) extrem steile, 4500 Nanometer hohe Strukturen erzeugt, deren Breite von 90 Nanometern etwa den typischen Säulendicken auf einer Metalinse entspricht. Das ist an der Grenze des Machbaren – und reicht trotzdem nicht, um in den benötigten Millimeterbereich vorzustoßen.

Aber womöglich gibt es einfachere Auswege. Analog zu üblichen, zusammengesetzten Linsengruppen, die ihre optischen Abbildungsfehler gegenseitig korrigieren, ließen sich mehrere Metalinsen stapeln. Oder eine Metaoberfläche könnte mit einer Glaslinse kombiniert werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Linsensystemen ersparte das zumindest einen Teil der Dicke und des Gewichts. Eine besondere Eigenschaft von Metalinsen brächte zusätzliche Vorteile: Bei ihnen sinkt die Brennweite tendenziell mit zunehmender Wellenlänge, das heißt, rotes Licht wird näher bei der Metalinse gebündelt als blaues. Bei klassischen Linsen ist es genau umgekehrt. So könnten darauf abgestimmte Nanostrukturen die typischen Farbfehler einer Glaslinse gerade ausgleichen. Außerdem kommen beispielsweise in Smartphones ohnehin bereits Computerprogramme zum Einsatz, die Bilder unmittelbar nach der Aufnahme optimieren. Und sind bei einer Metalinse die Abbildungsfehler im Weißlicht im Vorhinein bekannt, lassen sie sich wieder herausrechnen. Das haben Forscher von der University of Washington 2018 demonstriert.

Vieles spricht dafür, dass Metaoberflächen optische Systeme auf die eine oder andere Weise noch kompakter und leistungsfähiger machen werden. Alles wird davon abhängen, wie erfolgreich und massenfertigungskompatibel die Wissenschaftler die Durchmesser aus dem Bereich einiger zehn Mikrometer in die Millimeterdimension treiben. So lange bleiben Metalinsen eine schlagkräftige Armada, die noch ihr Leuchtturmfeuer sucht. ◂

Mike Beckers ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

QUELLEN

Chen, W.T. et al.: A broadband achromatic polarization-insensitive metalens consisting of anisotropic nanostructures. Nature Communications 10, 2019

Chen, W.T. et al.: Broadband achromatic metasurface-refractive optics. Nano Letters 18, 2018

Colburn, S. et al.: Metasurface optics for full-color computational imaging. Science Advances 4, 2018

PALÄOKLIMATOLOGIE
DAS ENDE DER BRONZEZEIT

Radiokarbon- und Keramikdatierungen bestätigen zusammen mit archäobotanischen Analysen eine lang gehegte Vermutung: Ein Klimawandel setzte um 1200 v. Chr. eine Kaskade in Gang, an deren Ende blühende Großreiche kollabierten.

▸ Wer sich für die nahe Zukunft unserer westlichen Kultur interessiert, sollte vielleicht auch einen Blick in die ferne Vergangenheit werfen. Genauer gesagt: auf den als »3.2kaBP event« bezeichneten Kollaps der Kulturen des östlichen Mittelmeerraums um 1200 v. Chr. Eine aktuelle Studie bestätigt den Verdacht, ein dramatischer Klimawandel habe maßgeblich dazu beigetragen, dass die mykenischen Paläste in Flammen aufgingen und das Großreich der Hethiter vom Erdboden verschwand. Innerhalb weniger Jahrzehnte war die Bronzezeit Geschichte; es sollte drei »dunkle Jahrhunderte« dauern, bis die Region erneut Hochkulturen hervorbrachte.

Über die Ursachen des jähen Epochenendes haben Forscher viel spekuliert. Die verschiedenen Reiche waren durch ein weit gespanntes Handelsnetz miteinander verbunden. Hatten die Eliten dieses System überreizt? Lösten wachsende gesellschaftliche Spannungen zwischen Arm und Reich womöglich Revolten aus? Welche Rolle spielten die in altägyptischen Texten erwähnten Überfälle durch »Seevölker«, und woher kamen diese?

Seit einigen Jahren mehren sich allerdings auch Hinweise auf lang andauernde Kälte und Dürre, die eine auf Ackerbau basierende Nahrungsversorgung und Wirtschaft in Schieflage bringen mussten. Insbesondere Pollenanalysen aus Bohrkernen von ehemaligen Seen sprechen eine deutliche Sprache: Von Italien bis zum Iran, von Griechenland bis in die Levante regnete es viel zu wenig, und statt fruchtbarer Felder breiteten sich Step-

pen aus. Doch die präzise Datierung dieser Befunde war bislang unklar.

Erstmals wurden nun Bodenproben aus archäologisch datierten Siedlungsschichten zweier Fundstätten paläoklimatologisch analysiert. Damit ist sicher: Der Untergang der Hochkulturen und die folgende dunkle Zeit ereigneten sich vor dem Hintergrund einer 300-jährigen Dürrephase.

Auf Zypern wählten die Archäologen der belgischen Universität Gent unter Leitung von Joachim Bretschneider einen küstennahen Siedlungsplatz nahe dem heutigen Pyla aus, der offenbar ein oder zwei Generationen lang besiedelt war. Sie untersuchten einen ins Felsplateau eingehauenen Schacht (siehe Bild unten), dessen Boden mit einer 30 Zentimeter dicken Ascheschicht bedeckt war. Darin steckte auch ein Tongefäß, das mit verbranntem pflanzlichem Material gefüllt war. Ob die Kammer beispielsweise als Zisterne oder Vorratsspeicher diente, darüber lässt sich vorerst nur spekulieren.

Ein hastiger Aufbruch

^{14}C-Messungen und Keramikzeitreihen datieren sie in die Zeit von etwa 1200 bis 1170 v. Chr. – die Keramiken gehören in der so genannten Ägäischen Chronologie in die Phase »Späthelladisch IIIC Früh 1«. Metallhorte und die Ausstattung mancher Häuser der Siedlung legen nahe, dass die Einwohner flohen und nur das Nötigste mitnahmen. Mit Licht- und Elektronenmikroskopen entdeckte das Team des Paläoökologen David Kaniewski von der Université Paul Sabatier Toulouse III verkohlte Körner von Weizen und Hafer, deren geringe Größe einen Wassermangel in der Wachstumsphase anzeigt. In dieses Bild passen auch Olivenkerne – die Bäume sind an eine von Trockenheit geprägte Lebenswelt angepasst.

Ein ähnliches Bild liefert die Fundstätte Tell Tweini an der heutigen syrischen Mittelmeerküste. Vermutlich ist sie mit dem in antiken Schriften erwähnten Gibala identisch, einer Hafenstadt im Königreich Ugarit, eingebunden in den Fernhandel mit der Ägäis, Zypern, Ägypten, Mesopotamien und dem Hethiterreich. Hier war es den Archäologen möglich, mehrere Siedlungsschichten zu untersuchen. Eine Ascheschicht und vereinzelte Pfeilspitzen deuten die Forscher als Hinweise auf Kriege oder Unruhen, die ^{14}C-Messungen und Keramiken zufolge um 1190 v. Chr. stattfanden. Das erinnert an den Kriegsbericht Ramses' III., der 1187 v. Chr. eine Invasion der so genannten Seevölker abgewehrt haben will. Eine zweite Zerstörungsschicht wurde auf die gleiche Weise in die Jahre 1050 bis 1000 v. Chr. datiert. Zu kleine Getreidekörner und die Kerne wilder Olivenbäume *(Olea oleaster)* im Erdreich bestätigen auch hier: Es herrschte Dürre, Ernten fielen mager aus. Ein Tontafelarchiv, das schon in den 1960er Jahren in der nahe gelegenen Königsstadt Ugarit ausgegraben wurde, verzeichnet Missernten und Hungersnöte.

Beide Fundstätten lassen sich in Bezug zu anderen Orten setzen, die seit Anfang der 2000er Jahre paläoklimatologisch untersucht werden. Die neuen Daten geben diesen Studien einen verlässlichen Zeitrahmen. Demnach erlebte der Mittelmeerraum von Italien über den Balkanraum und die Levante bis nach Ägypten und in den Iran hinein ab dem Anfang des 12. Jahrhunderts v. Chr. eine dramatische Trockenphase, die 300 Jahre lang anhielt und nur in der Levante kurz von einer etwas feuchteren Zeit unterbrochen wurde. Ganze Landstriche verödeten. In einer Region, die ohnehin mit wenig Niederschlag auskommen musste,

Ein Schacht aus der Bronzezeit Zyperns lieferte den Forschern neue Hinweise auf die um 1200 v. Chr. einsetzende Dürre.

JOACHIM BRETSCHNEIDER, UNIVERSITEIT GENT



brachten Äcker keine Frucht mehr hervor, das Vieh fand keine Weiden. Flüchtlinge überfielen die Nachbarstaaten und drängten in deren Siedlungsgebiete. Das auf einem globalisierten Handel basierende Wirtschaftssystem der Späten Bronzezeit musste letztlich kollabieren.

Das Ende dieser Dürrezeit hatten die Forscher bereits 2009 anhand von Sedimenten aus der Umgebung von Tell Tweini bestimmt: Im 9. oder 8. Jahrhundert v. Chr. eroberten Ackerbau und Viehzucht die Levanteküste zurück. Auch das passt vielerorts zum archäologischen Befund: Die Eisenzeit hatte begonnen, die dunklen Jahrhunderte waren vorüber. ◂

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur und Koordinator Archäologie Geschichte bei Spektrum der Wissenschaft.

QUELLE

Kanieswki, D. et al.: 300-year drought frames Late Bronze Age to Early Iron Age transition in the Near East: new palaeoecological data from Cyprus and Syria. In: Regional Environmental Change. Springer, 2019

MATHEMATIK

ABELPREIS FÜR KAREN UHLENBECK

Als erste Frau erhält sie die nobelpreisähnliche Auszeichnung. In ihren bahnbrechenden Arbeiten vereinte sie die Geometrie mit der Analysis und erschloss damit ein neues mathematisches Gebiet.

▶ Karen Uhlenbecks Leistungen haben »zu einigen der dramatischsten Fortschritte in der Mathematik der letzten 40 Jahre geführt«, hieß es bei der Verleihung des Abelpreises 2019, der als mathematisches Äquivalent des Nobelpreises gilt. Damit würdigte die Norwegische Akademie der Wissenschaften das Lebenswerk der Forscherin, die eine ganze Generation von Mathematikern prägte.

Uhlenbeck kam 1942 in Cleveland zur Welt. Ihr Interesse an Mathematik entdeckte die wissbegierige Vielleserin erst bei einer Einführungsveranstaltung an der University of Michigan: »Die Struktur, Eleganz und Schönheit der Mathematik hat mich sofort in ihren Bann gezogen, und ich habe mein Herz an sie verloren«, erzählt sie 2009 in dem Buch »Mathematicians: An outer view of the inner world« von Mariana Ruth Cook. Zudem bot die mathematische Forschung aus ihrer Sicht einen weiteren Vorteil: Man hat die Möglichkeit, völlig allein an einem Projekt zu arbeiten. In jungen Jahren schreckte die Wissenschaftlerin nämlich vor jeder Art von Beruf zurück, in der man viel mit Menschen zu tun hat.

Mitte der 1960er Jahre begann sie ihre Doktorarbeit an der Brandeis University in Massachusetts, wo sie Richard Palais als ihren Betreuer wählte. Zu dieser Zeit hatte Palais zusammen mit Stephen Smale, der kurz darauf die Fields-Medaille erhielt, gerade große Fortschritte bei der Erforschung so genannter harmonischer Abbildungen gemacht. Diese gehen auf das jahrhundertealte Feld der Variationsrechnung zurück. Dabei sucht man nach Formen, die Extremwertprobleme lösen.

Eines der berühmtesten Beispiele dafür ist das 1696 von Johann Bernoulli aufgeworfene »Brachistochronen«-Problem: Entlang welcher Kurve rollt eine Kugel am schnellsten von einem Punkt zum anderen? Auch außerhalb der Mathematik entpuppen sich solche Aufgaben als überaus wichtig. In der Physik lassen sich beispielsweise die Bahnkurven von Teilchen durch Formeln beschreiben, die eine gewisse Energiegleichung minimieren.

Harmonische Abbildungen sind ebenfalls Lösungen bestimmter Extremwertprobleme. Dazu kann man sich ein unendlich dünnes Haargummi (quasi ein Kreis) vorstellen, das man auf ein starres Objekt aufbringt, etwa eine Kugel. Um zu testen, ob die Positionierung des Haargummis eine harmonische Abbildung ist, lässt man es einfach los: Rollt es sich wegen seiner elastischen Spannung ab, dann ist die Abbildung nicht harmonisch. Verharrt es dagegen im Gleichgewicht, hat man eine solche Abbildung gefunden. Anschaulich gesehen sucht man also nach einer Form, die das kleinste elastische Potenzial hat. Mathematiker sagen, dass in diesem Fall die »Dirichlet-Energie« minimal ist.

Auf einer Kugel wird das Haargummi immer einen Kreis beschreiben, der sich, wenn man ihn leicht anstupst, zu einem Punkt zusammenzieht. Deshalb gibt es genau eine harmonische Abbildung auf ihr. Betrachtet man statt einer Kugel aber eine kompliziertere Oberfläche mit Löchern, wird es schwieriger. Man kann das Haargummi beispielsweise um das Loch eines Donuts wickeln: Dann kann es sich nicht mehr zu einem Punkt zusammenziehen, ohne die Oberfläche zu verlassen – stattdessen wird es dem kürzesten Weg um das Loch folgen.

Haargummi trifft Donut

Zudem können harmonische Abbildungen mehr als eine Dimension haben. In diesen Fällen werden sie nicht mehr von Haargummis, sondern anderen verformbaren Objekten beschrieben. Man kann etwa eine Abbildung suchen, die einen elastischen Ball um einen dreidimensionalen Raum stülpt. In solchen Situationen ist es häufig schwer, alle möglichen harmonischen Abbildungen zu finden, weil ein physikalisches Modell fehlt, aus dem man erkennt, wie sich die gummiartige Figur verhalten wird: Ist sie im Gleichgewicht, oder wird sie sich abrollen?

Daher entwickelten Mathematiker eine Methode, um harmonische Lösungen zu konstruieren: Zuerst startet man mit einer beliebigen Abbildung, die dann nach und nach so verändert wird, dass die gummiartige Form in



ANDREA KANE/INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY

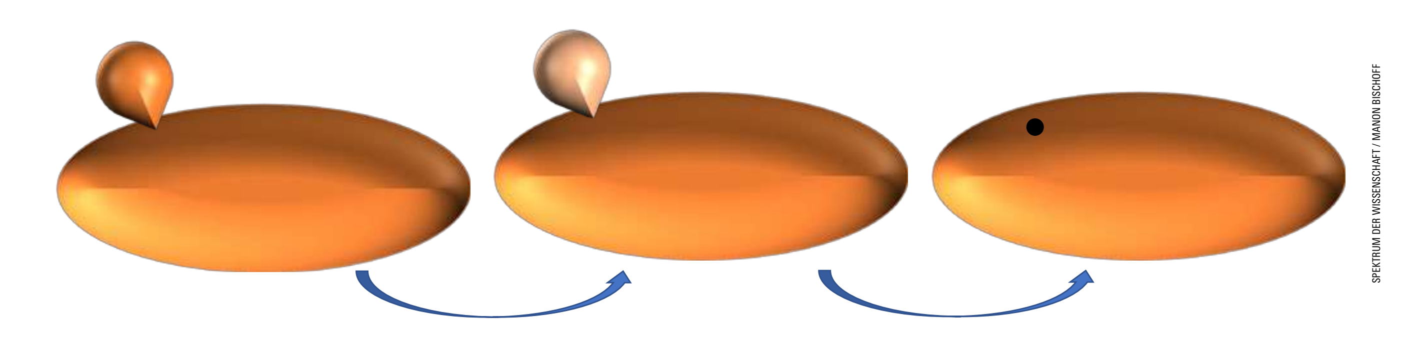
Karen Uhlenbecks Forschung prägte nicht nur die Mathematik, sie brachte auch große Fortschritte in der Physik.

jedem Schritt weniger elastische Spannung hat.

1964 fanden Palais und Smale jedoch heraus, dass der wiederholte Verformungsprozess nur dann zu einem Gleichgewichtszustand führt, wenn die betreffende Energiegleichung eine gewisse Bedingung erfüllt. Das eindimensionale Problem der Dirichlet-Energie, das ein Haargummi über einer starren Oberfläche beschreibt, erfüllt diese Palais-Smale-Bedingung. Das heißt, man kann durch wiederholtes Verformen immer einen Gleichgewichtszustand finden. Wenn die gummiartige Form aber höherdimensional ist, etwa eine Kugel, dann kann die Palais-Smale-Bedingung verletzt sein. Die allmähliche Veränderung einer Abbildung führt daher nicht immer zu einer harmonischen Lösung. Damals verstand allerdings niemand, was in solchen Fällen schiefläuft.

Als Uhlenbeck Mitte der 1970er Jahre Professorin an der University of Illinois in Urbana-Champaign war, widmete sie sich dieser Frage. In ihren fünf Jahren dort war sie nicht besonders glücklich. Da sie und ihr Mann gleichzeitig einen Posten an der Universität antraten, hatte sie das Gefühl, in erster Linie als »Frau des Professors« gesehen zu werden. Doch in dieser Zeit begegnete sie auch dem damaligen Postdoc Jonathan Sacks, mit dem sie wichtige wissenschaftliche Erfolge erzielen sollte.

Da man harmonische Abbildungen zweidimensionaler gummiartiger Oberflächen nicht über wiederholte Verformungen finden kann, überlegten sich Uhlenbeck und Sacks einen Umweg. Anstatt die Dirichlet-Energie direkt zu betrachten, konzentrierten sie sich auf eine Folge anderer Energiegleichungen, welche die Palais-Smale-Bedingung erfüllen, sich dabei aber der Dirichlet-Energie immer weiter nähern. Uhlenbeck und Sacks fragten



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Verformt man nach und nach eine zweidimensionale elastische Form, um eine bestimmte Energiegleichung zu minimieren, können sich an manchen Stellen Blasen bilden (links). Je näher diese Energiegleichung an die Dirichlet-Energie rückt, desto dünner wird das Material um die Blase (Mitte), sie steht dann unter starker Spannung. An der Dirichlet-Energie selbst (rechts) besteht die Blase nur noch aus einem Punkt (schwarz) – an dieser Stelle ist die minimierende Abbildung nicht definiert.

sich, ob die Abbildungen, welche die Energiegleichungen minimieren, irgendwann zu einer harmonischen Abbildung konvergieren, wenn die entsprechenden Energiegleichungen immer näher an die Dirichlet-Energie heranrücken.

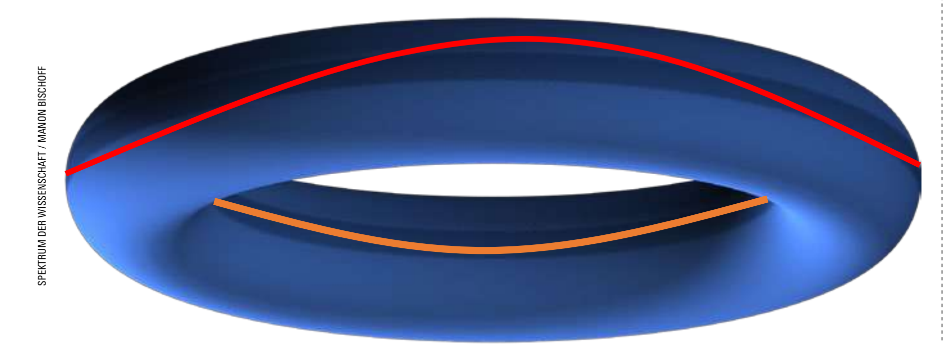
Anfang der 1980er Jahre konnten Uhlenbeck und Sacks zeigen, dass die Antwort auf die Frage »fast« lautet. Die Abbildungen der Energiegleichungen, welche die Form der gummiartigen Oberfläche beschreiben, konvergieren an beinahe jedem Punkt zu einer harmonischen Abbildung. Allerdings bilden sie an manchen Stellen eine seltsame Art Blase, an der die elastische Spannung groß ist und die daher nicht dem Gleichgewichtszustand entspricht.

Die Blasen ähneln denjenigen, die man mit einem Kaugummi erzeugen kann. Zieht man allmählich immer mehr von dem Kaugummi zurück in den Mund, während man die Blase auf gleicher Größe hält, wird das Material um die Blase immer dünner. Unter der Annahme, dass der Kaugummi beliebig dehnbar ist, bleibt sie aber bestehen. Irgendwann wird man jedoch den gesamten Kaugummi im Mund haben, so dass die Blase platzt. Etwas Ähnliches passiert mit den Abbildungen der Energiegleichungen auf dem Weg zur Dirichlet-Energie.

Sacks und Uhlenbeck wiesen nach, dass die Blasen der gummiartigen Formen immer kleinere Bereiche der Oberfläche enthalten, während sich die Energiegleichungen der Dirichlet-Energie nähern. Erreicht man schließlich die Dirichlet-Energie, würde die Blase nur noch aus einem einzigen Punkt bestehen: An dieser Stelle lässt sich die Abbildung nicht mehr definieren, es entsteht eine so genannte Singularität.

Glücklicherweise können nicht beliebig viele dieser Blasen auftauchen. Ihre Anzahl hängt von dem Raum ab, um den man die zweidimensionale gummiartige Form stülpt. Die Blasen können nämlich nur um ein Loch herum entstehen. Und da jeder Raum eine begrenzte Anzahl an Löchern hat, ist dadurch auch die Zahl der Blasen endlich.

Platziert man ein Haargummi (rot) um das Loch eines Torus (blau), kann es sich nicht mehr zu einem Punkt zusammenziehen, ohne den Torus zu verlassen. Den Zustand geringster elastischer Spannung (orange) erreicht es, wenn es dem kürzesten Weg um das Loch folgt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Von der Mathematik zur Physik

An der Anzahl der Löcher eines Raums sind insbesondere Topologen interessiert, die Formen ungeachtet ihrer geometrischen Details kategorisieren. Für sie sind beispielsweise eine Tasse und ein Donut gleich, da beide jeweils ein Loch haben. Durch ihre Arbeit haben Uhlenbeck und Sacks also harmonische Abbildungen, die aus der Analysis stammen, mit der Topologie und der Geometrie verbunden, woraus ein neuer mathematischer Bereich entstand: die moderne »geometrische Analysis«.

Nach ihrer Entdeckung tauchten die seltsamen Blasen plötzlich in vielen verschiedenen Gebieten der Mathematik und der Physik auf. Das führte Uhlenbeck in den frühen 1980er Jahren zur Eichtheorie. Dieser Ansatz, der dem Elektromagnetismus entsprang, bildet inzwischen die mathematische Grundlage vieler physikalischer Theorien, darunter des Standardmodells der Teilchenphysik. In der Eichtheorie geht es – wie bei harmonischen Abbildungen auch – darum, Objekte zu finden,

die eine Energiegleichung minimieren. Im Elektromagnetismus sind solche Objekte Lösungen der berühmten Maxwell-Gleichungen, in allgemeinen Eichtheorien erfüllen sie die komplizierten so genannten Yang-Mills-Gleichungen.

In diesem Zusammenhang konnte Uhlenbeck ihren berühmten Satz der »hebbaren Singularitäten« beweisen. Er besagt, dass vierdimensionale gummiartige Formen keine Blasen um isolierte Punkte herum bilden können. Hat man also eine endliche Lösung der Yang-Mills-Gleichungen in der Umgebung eines Punkts gefunden, dann lässt sich die Lösung auch problemlos auf den Punkt selbst erweitern, ohne störende Singularität. Diese Erkenntnisse »untermauern die meisten späteren Veröffentlichungen der mathematischen Eichtheorie«, sagt Simon Donaldson vom Imperial College London, der 1986 eine Fields-Medaille für seine Ergebnisse erhielt, die auf Uhlenbecks Arbeiten aufbauen.

Nun ging der Abelpreis erstmals in seiner 17-jährigen Geschichte an eine Frau. Die Rolle der Pionierin hat Uhlenbeck nicht zum ersten Mal inne. 1990 war sie etwa nach Emmy Noether die zweite Frau, die jemals einen Plenarvortrag auf dem Internationalen Kongress der Mathematiker hielt. Damit beendete sie eine 58 Jahre andauernde Durststrecke der männerdominierten Veranstaltung. Mit der Zeit wurde sie zu einer inspirierenden Figur für eine ganze Generation von Mathematikerinnen und Mathematikern.

Ab Anfang der 1990er Jahre leitete sie mit anderen ein Mentorenprogramm für Frauen in der Mathematik am Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey. »Vorbild zu sein, ist eine Herausforderung«, schrieb sie 1996, »denn man muss den Studenten zeigen, wie unvollkommen ein Mensch sein kann und dabei dennoch erfolgreich. Ich bin vielleicht eine gute Mathematikerin, aber ich bin auch sehr menschlich.« ◂

Erica Klarreich hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien).

QUELLEN

Palais, R. S., Smale, S.: A generalized Morse theory. Bulletin of the American Mathematical Society 70, 1964

Sacks, J., Uhlenbeck, K.: Minimal immersions of closed Riemann surfaces. Transactions of the American Mathematical Society 271, 1982

Uhlenbeck, K.: Removable singularities in Yang-Mills fields. Communications in Mathematical Physics 83, 1982

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »Karen Uhlenbeck, Uniter of Geometry and Analysis, Wins Abel Prize« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



WISSENSCHAFTSFÖRDERUNG
TEURES SYSTEMVERSAGEN

Die Art und Weise, wie wir Fördergelder vergeben, ist verschwenderisch und behindert den Fortschritt. Die zehn größten Fehlentwicklungen und mögliche Lösungen: Ein Meinungsbeitrag.

Jahr für Jahr fließen weltweit mehr als zwei Billionen Dollar in die Forschung und Entwicklung, und Jahr für Jahr erscheinen mehrere Millionen Fachartikel. Können wir uns also beruhigt zurücklehnen und uns am wissenschaftlichen Fortschritt erfreuen? Die Hinweise mehren sich, dass die Art und Weise, wie wir Forschung betreiben, evaluieren und in der Öffentlichkeit kommunizieren, erschreckend wenig effektiv sind. Eine Artikelserie beispielsweise, die im Jahr 2014 in der Fachzeitschrift »Lancet« erschien, kam zu dem Ergebnis, dass rund 85 Prozent der in die biomedizinische Forschung investierten Gelder weitgehend nutzlos verschwendet werden. In vielen anderen Wissenschaftsbereichen sieht es ähnlich aus. Unser System der finanziellen Förderung versagt gleich in mehreren Punkten – doch es gibt mögliche Lösungen dafür.

1 Wir fördern zu wenige Wissenschaftler

Der Großteil der Mittel konzentriert sich momentan auf nur wenige Forscher. Es gibt aber viele talentierte Wissenschaftler(innen), deren beruflicher Erfolg sowohl von harter Arbeit als auch von glücklichen Fügungen abhängt. Jene, die zurzeit in den Genuss üppiger Fördermittel kommen, sind nicht unbedingt die produktivsten Genies, sondern oft nur besonders gut vernetzt.

Mögliche Lösungen:

- Fördermittelvergabe per Los. Objektiv mangelhafte Anträge könnte man vorher mittels einer Prüfmethode aussieben, die sich freilich auf grundlegende Dinge konzentrieren sollte. Ein Losverfahren würde das mühsame und teure Prüfen der Anträge ersparen und deutlich mehr Forschern die Chance auf Förderung geben.
- Festsetzen einer Obergrenze für die Beträge, die einzelnen Personen zukommen können. Der Vorschlag kursiert schon seit Längerem, doch renommierte Wissenschaftsinstitutionen, die stark von der Konzentration finanzieller Mittel profitieren, sind erfolgreich dagegen vorgegangen. Eine Umschichtung der Fördermittel

von älteren auf jüngere Forscher, zumal innerhalb desselben Labors, würde diese Institutionen nicht benachteiligen, aber leitende Wissenschaftler aufgeschlossener gegenüber Innovationen machen.

2 Wir belohnen Transparenz nicht

Versuchsabläufe, Analysemethoden, Datenverarbeitung und leider auch die Daten selbst sind häufig undurchsichtig. Viel zu oft stellen Wissenschaftler fest, dass sich Aufsehen erregende Ergebnisse von Kollegen nicht reproduzieren lassen. Das trifft in der Psychologie auf zwei von drei vermeintlichen Top-Veröffentlichungen zu, in der experimentellen Wirtschaftsforschung auf eine von drei und in der Krebsforschung sogar auf drei von vier. Der wichtigste Grund dafür lautet, dass Wissenschaftler weder für Transparenz noch für das Teilen von Arbeitstechniken oder Software belohnt werden. Im Gegenteil: Derlei Bemühungen um gute wissenschaftliche Praxis sind mit handfesten Nachteilen verbunden. Denn angesichts der Konkurrenz fragen sich viele Forscher, warum sie ihren Mitbewerbern wertvolles Rüstzeug liefern oder kostbare Daten mit ihnen teilen sollten.

Mögliche Lösungen:

- Ein geeignetes Umfeld schaffen, um Transparenz, Offenheit und das Teilen von Arbeitstechniken oder Software zu fördern.
- Transparenz zu einer notwendigen Voraussetzung machen, um Fördermittel zu erhalten.
- Bevorzugt solche Forscher beschäftigen, fördern oder für eine Zusammenarbeit auswählen, die für Transparenz einstehen.

3 Wir ermutigen nicht dazu, Ergebnisse zu reproduzieren

Unter dem ständigen Druck, neue Resultate zu liefern, zeigen Forscher oft wenig Interesse daran, jene früherer Untersuchungen zu reproduzieren. Dabei gehört die unabhängige Bestätigung eines Experiments zum Kern wissenschaftlicher Arbeit. Ohne Bemühungen in diese Richtung laufen wir Gefahr, die Fachzeitschriften mit Fehlinformationen zu überfluten, die niemals korrigiert werden.

Mögliche Lösungen:

- Fördermittelgeber unterstützen auch die Reproduktion von Studien.
- Die finanzielle Unterstützung von Wissenschaftlern unter anderem daran festmachen, inwieweit sie Experimente anderer nachvollzogen haben beziehungsweise ihre eigenen Ergebnisse von Kollegen reproduziert werden konnten.

4 Wir fördern kaum junge Wissenschaftler

Im biomedizinischen Bereich sind Wissenschaftler durchschnittlich 46 Jahre alt, wenn sie das erste Mal in den Genuss substanzieller Fördermittel kommen – Tendenz steigend. Das mittlere Alter ordentlicher Professoren in den USA liegt bei 55 und wächst kontinuierlich an. Von den Fördermitteln der National Institutes of Health (NIH) in den USA gingen im Jahr 2014 weniger als zwei Prozent an Forschungsgruppenleiter unter 36 Jahren, während nahezu zehn Prozent an 66-Jährige und Ältere gingen. In anderen Wissenschaftsdisziplinen ist die Situation ähnlich, und sie lässt sich nicht einfach mit der gestiegenen Lebenserwartung erklären. Werner Heisenberg, Albert Einstein, Paul Dirac und Wolfgang Pauli waren Mitte 20, als sie ihre bedeutenden Arbeiten veröffentlichten. Man stelle sich vor, sie hätten damals gesagt bekommen, auf eine Förderung müssten sie noch 25 Jahre warten. Für nicht wenige könnte die Konsequenz daraus sein, sich aus der Forschung zu verabschieden.

Mögliche Lösungen:

- Einen größeren Anteil der Fördermittel jungen Forschern zukommen lassen.
- An Universitäten mehr jüngere Forscher einstellen und so das Durchschnittsalter in den Fakultäten senken.

5 Wir stützen uns auf voreingenommene Mittelgeber

In den USA stammen die meisten Gelder für Forschung und Entwicklung nicht von staatlichen Institutionen, sondern aus privaten, gewinnorientierten Quellen, was unausweichlich zu Interessenkonflikten führt. In klinischen Studien etwa, die von der Pharmaindustrie gesponsert werden, besteht eine um 27 Prozent höhere Wahrscheinlichkeit, zu für den Geldgeber günstigen Ergebnissen zu kommen, als bei öffentlich geförderten Studien. In vielen Bereichen hat sich die Offenlegung von Interessenkonflikten zwar verbessert, aber investigative Untersuchungen deuten darauf hin, dass hier noch sehr viel zu tun bleibt.

Mögliche Lösungen:

- Die Förderung von Projekten einschränken oder verbieten, bei denen offensichtlich Interessenkonflikte bestehen. Fachzeitschriften sollten keine Arbeiten annehmen, die solchen Konflikten unterliegen.
- Bei weniger eindeutigen Interessenkonflikten zumindest Transparenz und gründliche Offenlegung sicherstellen.

6 Wir fördern die falschen Disziplinen

Manche Forschungsgebiete sind erfolgreicher als andere darin, Ressourcen an sich zu ziehen. Üppig finanzierte Disziplinen locken mehr Forscher an, was ihrer Lobbyarbeit ein größeres Gewicht verleiht, woraufhin sie wiederum mehr Mittel einwerben können und so weiter – ein Teufelskreis. Einige Fachbereiche absorbieren auf diese Weise enorme Fördergelder, obwohl ihre Produktivität gering ist oder ihr Nutzen zweifelhaft. Weiterhin in solche Bereiche zu investieren, ist unsinnig.

Mögliche Lösungen:

- Großzügig finanzierte Disziplinen unabhängig und überparteilich bewerten lassen und dabei besonders ihren fachlichen Ertrag unter die Lupe nehmen.
- Mehr Mittel für innovative und risikoreiche Forschung bereitstellen.
- Wissenschaftler dazu ermutigen, das Arbeitsgebiet zu wechseln, falls triftige Gründe dafür sprechen. Derzeit wird die Fokussierung auf ein eng

begrenztes Gebiet belohnt, was zur massenhaften Entstehung von »Fachidioten« führt.

7 Wir geben nicht genug Fördermittel aus

In vielen Ländern stagniert die Förderung durch die öffentliche Hand und steht in zunehmender Konkurrenz zu anderen Budgetposten. In den USA beispielsweise sind die Militärausgaben mit rund 900 Milliarden Dollar gut 24-mal so hoch wie das Budget der NIH, das lediglich 37 Milliarden Dollar umfasst. Der geschätzte Wert eines einzelnen Fußballvereins wie Manchester United (4,1 Milliarden Dollar) liegt über dem jährlichen Forschungsbudget selbst der renommiertesten Universitäten. Dabei kommen Investitionen in die Wissenschaft der ganzen Gesellschaft zugute. Leider erweisen Wissenschaftsrepräsentanten ihrer Sache häufig einen Bärendienst, wenn sie die Öffentlichkeit zu überzeugen versuchen und dabei Unmögliches wie den baldigen Sieg über Krebs- oder Alzheimererkrankungen versprechen.

Mögliche Lösungen:

- Klarer kommunizieren, wie Fördermittel eingesetzt werden. Den Prozess des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns besser erklären und deutlicher machen, wie viel Arbeit es erfordert, wichtige Durchbrüche zu erzielen. Universitäten, Museen und Wissenschaftsjournalisten können hieran mitwirken.
- Deutlicher machen, wie hart Wissenschaftler daran arbeiten, Methoden und Abläufe zu verbessern.

8 Wir belohnen große Verschwender

Gute Karrierechancen bieten sich vor allem solchen Wissenschaftlern, die in der Lage sind, umfangreiche Fördermittel einzuwerben. Aber die Kosten eines Projekts korrelieren nicht notwendigerweise mit seiner Bedeutung. Unser Belohnungs- und Auswahlsystem begünstigt insbesondere politisch gewiefte Manager-Persönlichkeiten, die wissen, wie sie Mittel an sich ziehen können.

Mögliche Lösungen:

- Wissenschaftler vor allem für hochwertige Arbeiten, Reproduzierbarkeit ihrer Ergebnisse und gesellschaftliche Relevanz ihrer Forschung belohnen – weniger jedoch für das Organisieren von finanzieller Unterstützung.
- Den Wert von Forschungsprojekten nicht nur an ihren Kosten bemessen. Spitzenforschung ist oft auch mit geringen finanziellen Mitteln möglich, erfordert allerdings in jedem Fall Zeit. Institutionen sollten diese Zeit zur Verfügung stellen und solche Wissenschaftler honorieren, die hervorragende Arbeit leisten, ohne haufenweise Geld zu verbrennen.

9 Wir finanzieren keine riskante Forschung

Gutachtergremien, selbst wenn sie sich aus exzellenten Wissenschaftlern zusammensetzen, reagieren allergisch auf Ideen, die ein hohes Risiko des Scheiterns bergen. Der Druck, Steuergelder sinnvoll auszugeben, bringt staatliche Fördermittelgeber dazu, eher solche Projekte zu unterstützen, die sehr wahrscheinlich positive Ergebnisse liefern werden – auch wenn die riskanteren Konkurrenzvorhaben zu deutlich wichtigeren Durchbrüchen führen könnten. Industrieunternehmen vermeiden es ebenfalls, risikoreiche Arbeiten zu finanzieren, und beobachten stattdessen, wie sich Start-ups an frischen Ideen abarbeiten (wobei diese oft scheitern). Neun der zehn größten Pharmaunternehmen geben mehr für Werbekampagnen als für Forschung und Entwicklung aus. Öffentliche Fördermittelgeber behaupten oft, sie würden »Innovationen« unterstützen. Das ist Unsinn, denn Innovationen im Voraus als solche zu erkennen, ist extrem schwierig bis unmöglich. Eine Idee, die der Überprüfung von 20 Gutachtern standhält (so viele sind bei den NIH typischerweise beteiligt), ist selten innovativ oder gar revolutionär. Auf allgemeine Akzeptanz stößt in der Regel das, was im Mainstream liegt oder schlicht mittelmäßig ist.

Mögliche Lösungen:

- Förderung von exzellenten Wissenschaftlern statt von Projekten. Forscher sollten die Freiheit haben, ihre Ansätze nach eigenem Ermessen zu verfolgen. Institutionen wie das Howard Hughes Medical Institute setzen das bereits mit Erfolg um.
- Der Öffentlichkeit und Entscheidungsträgern klarmachen, dass Wissenschaft eine kumulative Investition ist. Von 1000 Projekten können 999 fehlschlagen, und wir können nicht vorher wissen, welches sich als erfolgreich erweist. Der Erfolg bemisst sich an der Gesamtagenda, nicht an einzelnen Experimenten oder Ergebnissen.

10 Wir haben zu wenig belastbare Daten

Es gibt nur wenige wissenschaftliche Erkenntnisse darüber, welche wissenschaftliche Praxis die beste ist. Wir brauchen mehr Forschung über die Forschung (»Meta-Forschung«), etwa in Form der Szientometrie, der Lehre vom Messen der Wissenschaften. Sie soll uns herausfinden helfen, wie man Wissenschaft am besten betreibt, bewertet, überprüft, fördert und kommuniziert.

Mögliche Lösung:

In Untersuchungen investieren, die sich damit befassen, wie man Wissenschaft am besten praktiziert und wie man die klügsten Köpfe auswählt und fördert. Ohne empirische Daten hierzu sollten wir keiner Meinung vertrauen – auch nicht meiner eigenen, die ich hier dargestellt habe. ◂

John P.A. Ioannidis ist Professor an der Stanford University und dort in den Bereichen Medizin, Gesundheitsforschung und -politik, biomedizinische Daten und Statistik tätig. Er ist Vizedirektor am Meta-Forschungszentrum METRICS (Meta-Research Innovation Center at Stanford). Ioannidis wurde vor allem durch seine Methodenkritik bekannt; 2005 veröffentlichte er den viel beachteten Fachartikel »Why Most Published Research Findings Are False« (Warum die meisten publizierten Forschungsergebnisse falsch sind).



SPRINGERS EINWÜRFE
DIE ALLZU KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Maschinelles Lernen verbucht verblüffende Resultate. Doch um weiterzukommen, müssen die neuronalen Netze noch einmal bei unserem Gehirn in die Lehre gehen.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

⏩ spektrum.de/artikel/1634778

Die Erfolge der künstlichen Intelligenz (KI) sind atemberaubend: Neuronale Netze können lernen, Sprachmuster zu erkennen, Objekte vom Hintergrund zu unterscheiden, Apparate durch unübersichtliches Gelände zu steuern, experimentelle Daten zu analysieren und Menschen beim Pokern zu schlagen. Das erstaunt umso mehr, als die KI vorläufig nur die primitivsten Anleihen bei der Informationsverarbeitung des Gehirns nimmt. Künstliche neuronale Netze bestehen aus einigen wenigen Schichten, in denen Datenkanäle mit variabler Signalstärke in Knoten zusammenlaufen. Obwohl derartige Systeme damit bloß stark vereinfachte Modelle von natürlichen Nervenzellen und Synapsen darstellen, sind sie zu jenen Leistungen fähig, die ihnen schon heutzutage den Anschein von einigermaßen intelligentem Verhalten verleihen.

Strukturell lassen sich die künstlichen Netze noch am ehesten mit den primären Verarbeitungsebenen eines tierischen Sehsystems vergleichen. Ihre Komplexität wird von höheren, zu kognitiven Leistungen fähigen Hirnarealen weit in den Schatten gestellt. Das betrifft vor allem den Grad der Vernetzung: Natürliche Nervenzellen einer bestimmten Verarbeitungsebene stehen nicht bloß auf- und abwärts mit den nächsthöheren und -tieferen Niveaus in Verbindung, sondern sind zudem horizontal, das heißt auf der eigenen Ebene vielfach verknüpft – anders als die meisten künstlichen Netze. Außerdem reichen die vertikalen Kontakte bei höheren Tieren weit über die nächstliegenden Organisationsebenen hinaus. In unserem Gehirn erstrecken sich die Nervenbahnen, die mit bewusstem Wahrnehmen oder Sprache assoziiert sind, über ganze Areale.

Was würden artifizielle Netze leisten, wenn sie sich derart reichhaltige Hirnstrukturen zum Vorbild nähmen? Könnten sie dann auf die Frage nach dem Inhalt eines Bilds umgangssprachlich antworten? Würden sie den Doppelsinn von Witzen und sarkastischen Bemerkungen verstehen?

Das Ziel solcher Überlegungen hat schon einen Namen: artificial general intelligence (AGI). Einen interessanten, geradezu philosophischen Aspekt diskutiert der israelische Informatiker und Kognitionsforscher Shimon Ullman vom Weizmann Institute of Science in Rehovot *(Science 363, S. 692–693, 2019)*.

Philosophen fragen seit jeher, ob unser Erkenntnisapparat eher einem leeren Blatt gleicht, auf dem sich Erfahrungen ansammeln, oder ob der menschliche Verstand bereits mit einer Vorprägung zur Welt kommt. Dieser alte Streit zwischen Empiristen und Rationalisten wurde wieder aktuell, als der Linguist Noam Chomsky behauptete, ein Kind könne unmöglich die komplexe Struktur seiner Muttersprache aus Beispielsätzen erlernen; der Spracherwerb setze eine angeborene »Tiefengrammatik« voraus.

Wie Ullman hervorhebt, entspricht die KI derzeit einem rein empiristischen Modell: Das neuronale Netz ist eine Tabula rasa, die erst durch den Dateninput konditioniert wird. Hingegen funktioniert unser Wahrnehmungsapparat offensichtlich nicht voraussetzungslos. Er bedient sich anscheinend angeborener »Proto-Konzepte«, um beispielsweise aus dem Zusammenspiel von Auge und Hand auf die Eigenschaften von Objekten zu schließen.

Ullman spekuliert nun, dass eine künftige künstliche allgemeine Intelligenz, die den Namen wirklich verdient, auf passend vorgeformten Netzen beruhen sollte. Deren Binnenstrukturen könnten autonom entstehen, indem Netze das einmal Gelernte an andere Netzgenerationen weiterreichen, so wie Kinder mit Hilfe eines durch Evolution und kulturelle Vererbung geprägten Denkapparats flink ihre Erfahrungen sammeln. In den Grundzügen klingt das viel versprechend – falls sich das Design eines solchen Systems in den Details nicht als ebenso verzwickt entpuppen wird wie der Versuch, unser Gehirn in seinen Einzelheiten zu verstehen.

MORAL

DIE GEBURT DES »WIR«

Die Wurzeln der menschlichen Moral liegen in der gemeinsamen Jagd, die Kooperation und Teamgeist förderte.


JACOBS FOUNDATION

Michael Tomasello ist Professor für Psychologie und Neurowissenschaft an der Duke University in Durham (USA) und emeritierter Direktor des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Hier leitete er bis 2018 die Abteilung für vergleichende und Entwicklungspsychologie sowie das Wolfgang-Köhler-Primatenforschungszentrum.

spektrum.de/artikel/1634750

»Survival of the fittest«, der am besten Angepasste überlebt – so lautet eine Grundregel der Evolution. Aber wie konnte sich dann der Mensch zu einem moralischen Wesen entwickeln? Wenn es nur darum geht, den eigenen Gewinn zu maximieren, warum entstand überhaupt unser Sinn für Gerechtigkeit und Hilfsbereitschaft?

Auf diese Fragen gibt es traditionell zwei Antworten. Erstens erscheint es für den Einzelnen sinnvoll, seinen Verwandten zu helfen, mit denen er seine Gene teilt – Forscher sprechen hier von Verwandtenselektion. Zweitens gilt das Prinzip der Gegenseitigkeit: Eine Hand wäscht die andere, und auf lange Sicht profitieren beide davon.

Aber Moral besteht nicht nur darin, nett zu Verwandten zu sein, wie das Bienen oder Ameisen tun. Und Gegenseitigkeit kann riskant werden, wenn der eine profitiert, sich aber dann aus dem Staub macht und den anderen im Regen stehen lässt. Außerdem dringt keine dieser traditionellen Erklärungen zum Kern der menschlichen Moral vor: zum Pflichtbewusstsein gegenüber unseren Mitmenschen.

In letzter Zeit rückte für die Frage nach der Moral eine neue Betrachtungsweise in den Vordergrund. Entscheidend dafür war die Erkenntnis, dass Menschen in einer sozialen Gruppe, in der jeder auf jeden zum Überleben und Wohlergehen angewiesen ist, nach einer ganz besonderen Prämisse handeln. In dieser Logik der gegenseitigen Abhängigkeit gilt das Prinzip: Wenn ich dich brauche, liegt es in meinem Interesse, für dein Wohlergehen zu sorgen. Oder allgemeiner gesagt: Wenn wir alle aufeinander angewiesen sind, müssen wir uns auch alle umeinander kümmern.

Wie kam es in der Evolution des Menschen dazu? Die Antwort findet sich in den besonderen Umständen, die Individuen zu immer mehr Kooperation zwangen – insbesondere bei der Beschaffung von Nahrung und anderer grundlegender Ressourcen.

Schimpansen und Bonobos, unsere engsten heute noch lebenden Verwandten, suchen gemeinsam in kleinen Gruppen nach Früchten und Pflanzen. Aber sobald sie fündig werden, frisst jedes Tier für sich allein. Konflikte werden durch Dominanz gelöst: Der beste Kämpfer gewinnt. Ein Sinn für Gemeinsamkeit scheint sich immerhin abzuzeichnen, wenn mehrere Schimpansenmännchen einen Kleinaffen umzingeln und fangen. Dieses Jagdverhal-

NO_LIMIT_PICTURES / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



NO_LIMIT_PICTURES / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SERIE

Was ist der Mensch?

ten ähnelt im Grunde jedoch eher dem von Löwen oder Wölfen als einer Form, die von Zusammenarbeit geprägt ist, wie sie beim Menschen vorherrscht. Jeder Schimpanse versucht, seine eigenen Chancen zu verbessern, indem er der Beute potenzielle Fluchtwege versperrt. Sobald ein Schimpanse den Kleinaffen erwischt, will er ihn allein verspeisen – was ihm aber in der Regel nicht gelingt. Schließlich kommen alle Individuen der Gruppe zur Beute und greifen zu. Der Fänger muss dies zulassen oder die anderen bekämpfen, was wohl darauf hinausliefe, in der Hitze des Gefechts die Nahrung ganz zu verlieren. Deshalb teilt sich die Gruppe bis zu einem gewissen Grad die Beute.

Der Mensch macht es schon seit Langem anders. Vor rund zwei Millionen Jahren tauchte die Gattung *Homo* mit ihrem großen Gehirn samt neuen Fähigkeiten zur Herstellung von Steinwerkzeugen auf. Wenig später führte eine globale Abkühlungs- und Trockenheitsperiode dazu, dass sich am Boden lebende Kleinaffen vermehrten und mit *Homo* um viele Ressourcen konkurrierten.

Jetzt waren Alternativen gefragt. Eine Möglichkeit bestand darin, Kadaver zu verwerten, die andere Tiere erlegt hatten. Doch einige Frühmenschen, vermutlich von der Art *Homo heidelbergensis*, begannen nach Ansicht der Anthropologin Mary Stiner von der University of Arizona vor rund 400000 Jahren, sich ihre Nahrung größtenteils selbst zu beschaffen, indem sie beim Jagen und Sammeln kooperierten und gemeinsam ihre Ziele verfolgten. Schließlich wurde die Zusammenarbeit für das Überleben unverzichtbar: Die Individuen waren unmittelbar und vollständig aufeinander angewiesen, um sich ihre tägliche Ernährung zu sichern.

Als wesentlich bei der obligatorischen gemeinsamen Nahrungssuche erwies sich die richtige Wahl der Partner. Individuen, die kognitiv oder aus irgendwelchen anderen Gründen unfähig zur Zusammenarbeit waren – vielleicht weil ihnen die entsprechenden Kommunikationsfähigkeiten fehlten –, wurden nicht ausgewählt und blieben so ohne Nahrung. Auch solche, die sich unkooperativ zeigten und möglicherweise versuchten, die ganze Beute an sich zu reißen, wurden gemieden und waren damit dem Untergang geweiht. Ergebnis: eine aktive soziale Selektion von fähigen, motivierten Individuen, die gut mit anderen zusammenarbeiteten.

Entscheidend für die Evolution der Moral wurden neue Formen der Beziehung untereinander. Kooperierende Frühmenschen entwickelten so etwas wie Sympathie füreinander und halfen sich gegenseitig aus einem einfachen Grund: Wer auf andere angewiesen ist, sollte dafür sorgen, dass es diesen auch in Zukunft gut geht. Zusätzlich hing das eigene Überleben davon ab, als kompetenter, motivierter Partner zu gelten. Entsprechend war es wichtig, wie man eingeschätzt wurde. Wie wir bei Studien in unserem Institut in Leipzig beobachteten, legen schon kleine Kinder Wert darauf, wie andere sie beurteilen – bei Schimpansen scheint das dagegen keine Rolle zu spielen.

Gemeinschaftliches Handeln erzeugt gegenseitig anerkannte Rechte

Der Vergleich der Verhaltensweisen unserer engsten Primatenverwandten mit denen von Kindern, die noch nicht die Normen ihrer Kultur verinnerlicht haben, hat sich als außerordentlich wertvoll erwiesen, um die Ursprünge des menschlichen Denkens und der Moral aufzuspüren. Schließlich fehlt es hierfür an historischen Aufzeichnungen und somit meist an fossilen oder archäologischen Funden. Unsere Studienergebnisse legen nahe, dass sich bei Frühmenschen eine neue Form des kooperativen Denkens entwickelte: Zuverlässige Partner bei der gemeinsamen Nahrungssuche kamen nicht nur in den Genuss von Sympathie, sondern auch von Fairness, also einem Gefühl der Gleichberechtigung. Die Einzelnen begriffen, dass sie bei der Kooperation prinzipiell jede beliebige Rolle übernehmen konnten und dass dabei alle an einem Strang zogen. Arbeiteten zwei Individuen wiederholt zusammen, entwickelte sich bei ihnen ein Verständnis für gemeinsame Interessen, wobei jeder eine bestimmte Rolle auszufüllen hatte, um im Team erfolgreich zu sein. Solche rollenspezifischen Maßstäbe prägten die Erwartung an das Handeln des anderen. So muss bei der Antilopenjagd der Treiber eine andere Handlung als der Speerwerfer ausführen. Diese idealisierten Vorgaben legten unparteiisch fest, wer was zu tun hatte, um den gemeinsamen Erfolg zu gewährleisten. Die Rollen, für die allseits bekannte Leistungsstandards galten, blieben austauschbar. Deshalb besaß jeder Jagdpartner aber auch das gleiche Anrecht auf die Beute – im Gegensatz zu Betrügern und Trittbrettfahrern, die keinen Finger krumm gemacht hatten.

Als Mitspieler für Gemeinschaftsunternehmungen bevorzugte man Individuen, welche die in sie gesetzten Erwartungen erfüllten. Um das Risiko eines Fehlgriffs zu mindern, konnten potenzielle Partner ihre Kooperationsfähigkeiten durch eine Art gemeinsamer Verpflichtungserklärung unterstreichen: Sie sagten sich gegenseitig zu, ihre Aufgaben zu erledigen, und forderten dafür eine faire Aufteilung der Beute. Außerdem konnten sich die zukünftigen Partner unausgesprochen darauf einigen, dass jemand, der nicht Wort hielt, eine Rüge verdient hatte. Wer von den Erwartungen abwich und dennoch weiterhin eine gute Stellung als Kooperationspartner anstrebte, verurteilte sich daher bereitwillig selbst – psychisch als Schuldgefühl verinnerlicht. So

AUF EINEN BLICK
DER WEG ZUR GRUPPENIDENTITÄT

1 Der Keim der menschlichen Moral entstand vermutlich vor rund 400000 Jahren, als Menschen begannen, gemeinsam zu jagen und Nahrung zu sammeln.

2 Die kooperativen Beziehungen wurden überlebensnotwendig und förderten ein Gefühl für gegenseitigen Respekt und Fairness.

3 Durch zunehmende Populationsgrößen festigten sich schließlich kollektive Gruppenidentitäten mit gemeinsamen kulturellen Praktiken und sozialen Normen.

Die Evolution der menschlichen Moral

Tiere kooperieren häufig mit Artgenossen; Menschen ebenso, aber anders. Die menschliche Form der Kooperation – Moral genannt – besteht aus zwei zusammenhängenden Aspekten: Ein Individuum vermag einem anderen aus selbstlosen Motiven wie Mitgefühl, Sorge oder Wohlwollen zu helfen. Zusätzlich streben die Mitglieder einer Gruppe danach, dass alle profitieren, und schaffen hierfür Normen für Fairness, Gleichberechtigung und Gerechtigkeit. Diese Fähigkeiten entwickelten sich im Lauf etlicher hunderttausend Jahre, als Menschen zunächst wegen schierer Überlebensnot begannen zusammenzuarbeiten. Die kognitiven und sozialen Aspekte dieses Prozesses kann man mit dem philosophischen Begriff der Intentionalität beschreiben. Er besagt, wie Personen die Welt interpretieren und ihre Ziele verfolgen.

Individuelle Intentionalität

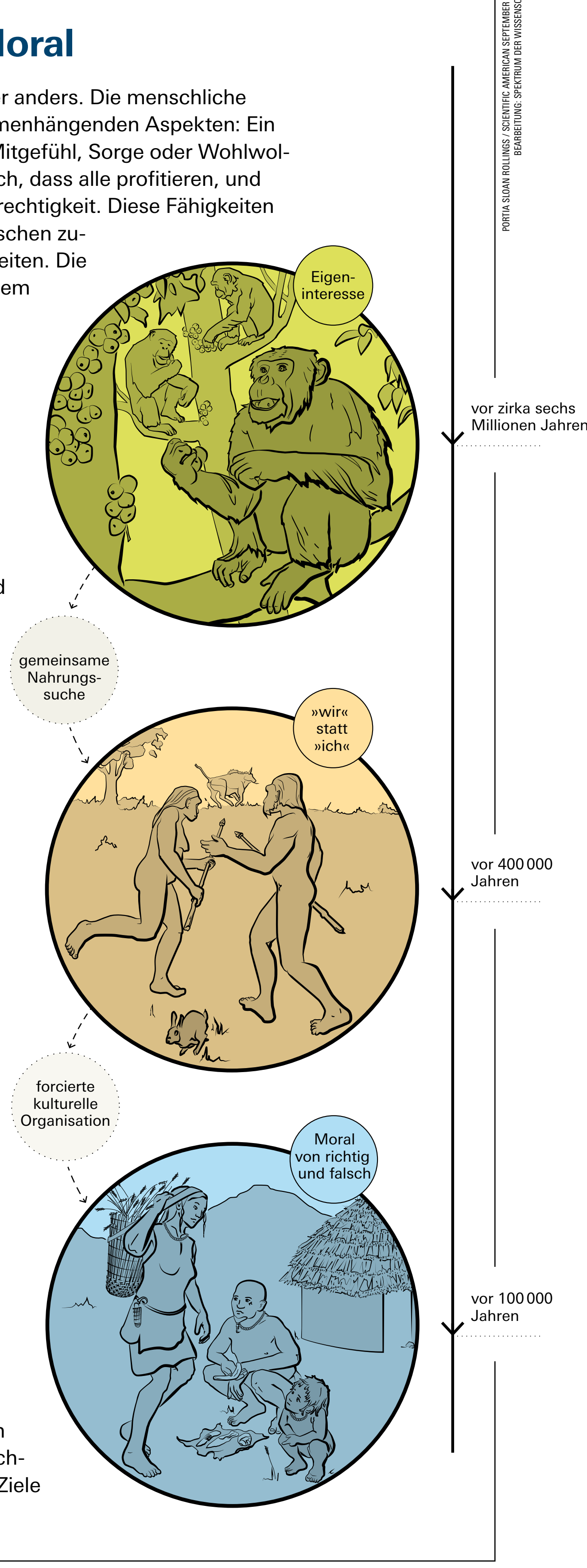
Charakteristisch für die individuelle Intentionalität ist die Fähigkeit, das Verhalten flexibel zu ändern und so ein Ziel zu erreichen – meist in Konkurrenz zu anderen. Diese Perspektive des Eigeninteresses ist die Haupttriebkraft von Schimpansen. Sie galt auch für den gemeinsamen Vorfahren von Schimpanse und Mensch und vermutlich für die ersten Homininen. Ein Beispiel sind Schimpansen auf Futtersuche: Eine kleine Gruppe sucht gemeinsam; aber sobald die Tiere Früchte finden, sammelt jeder für sich und frisst seinen Teil, ohne mit anderen Gruppenmitgliedern zu kooperieren. Ähnlich egozentrisch handeln die Affen bei der Jagd.

Gemeinsame Intentionalität

Vor rund 400 000 Jahren erschloss sich *Homo heidelbergensis* bessere Nahrungsquellen. Im Gegensatz zur Kleintierjagd erforderte das Erlegen von Auerochsen und anderem Großwild verstärkte Kooperation – eine gemeinsame Intentionalität, die sich auf übereinstimmende Ziele konzentrierte. Diese Form der Teamarbeit unterscheidet sich drastisch vom Durcheinander jagender Schimpansen, bei denen das Prinzip »jeder für sich« herrscht. Die steinzeitlichen Jäger und Sammler konnten nur dann überleben, wenn ihre Praktiken der Nahrungssuche verpflichtend wurden und nicht mehr eine Frage der Beliebigkeit waren. Als Jagdpartner bevorzugte man Individuen, die unausgesprochen die Notwendigkeit der Kooperation verstanden und die Beute nicht rücksichtslos an sich rissen. Eine »zweitpersonale Moral« entstand: Die Menschen begriffen, dass sie das Ich dem Wir unterordnen mussten.

Kollektive Intentionalität

Vor rund 150 000 Jahren vergrößerten sich die Gruppen: Kleinere Horden bildeten einen Stamm mit gemeinsamen Praktiken und legten damit den Keim der menschlichen Kultur. Ein System aus Normen, Konventionen und Institutionen wuchs heran und definierte sowohl die Gruppenziele als auch die Arbeitsteilung, die den Mitgliedern ihre Rollen zuwies – diese kollektive Intentionalität zeichnete den jeweiligen Stamm aus. Jedes Mitglied verinnerlichte die Ziele als »objektive Moral«, die festlegte, was richtig und was falsch ist.



durchbrach bei den gemeinschaftlichen Aktionen das »Wir« die egoistisch-individuelle Ebene und steuerte die Handlungen der Kooperationspartner »Ich« und »Du«. Der Mensch entwickelte eine »geteilte Intentionalität«: die Fähigkeit, gemeinsame Ziele zu definieren (siehe »Die Evolution der menschlichen Moral«, S. 37).

Die Anpassung der Frühmenschen an eine obligatorisch gemeinsame Nahrungssuche führte damit zu einer »zweitpersonalen Moral« – zur Neigung, Beziehungen zu anderen mit einem Gefühl des Respekts und der Fairness einzugehen, basierend auf der Grundlage, dass sowohl ich selbst als auch die anderen gleichermaßen verdienstvolle Mitspieler des Gemeinschaftsunternehmens darstellen. Dieses Gespür für Fairness wurde verstärkt durch ein Pflichtgefühl dem Mitmenschen gegenüber. Zwar verfolgen alle Primaten ihre individuellen Ziele, wegen der gegenseitigen sozialen Abhängigkeiten der Frühmenschen fühlten sich die Individuen jedoch ebenfalls verpflichtet, andere so zu behandeln, wie sie es verdient hatten, und erwarteten umgekehrt dasselbe für sich. Diese zweitpersonale Moral besaß noch nicht alle Merkmale unserer jetzigen, aber die wichtigsten Elemente – gegenseitiger Respekt und Fairness – waren ansatzweise bereits vorhanden.


FOTOLIA / PERCENT

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/altruismus**

Der zweite entscheidende Schritt in der Evolution der menschlichen Moral trat ein, als zwei demografische Faktoren die gemeinsame, im kleinen Maßstab stattfindende Nahrungssuche der Frühmenschen destabilisierten und damit vor mehr als 200 000 Jahren *Homo sapiens* entstehen ließen. Die neue Ära begann durch die Konkurrenz zwischen Menschengruppen. Auf Grund der Auseinandersetzungen mussten sich locker strukturierte Populationen in engere soziale Verbände verwandeln, die sich gegen äußere Eindringlinge wehren konnten. In jeder dieser Gruppen entwickelte sich eine interne Arbeitsteilung, und das alles führte zu einer kollektiven Gruppenidentität.

Gleichzeitig nahm die Populationsgröße zu. Als die Zahl der Menschen in den Stammesgruppen wuchs, spalteten sich die größeren Einheiten in kleinere Untergruppen auf, die sich immer noch an die Übergruppe – die man jetzt als eigenständige »Kultur« bezeichnen könnte – gebunden fühlten. Nun erwies es sich als unverzichtbar, Mitglieder der eigenen kulturellen Gruppe, die nicht unbedingt enge Verwandte waren, zu erkennen – und sie von Personen anderer Verbände zu unterscheiden. Das war wichtig, weil man sich nur bei Mitgliedern darauf verlassen konnte, dass sie dieselben Fähigkeiten und Werte teilten und insbesondere bei der Verteidigung der Gruppe vertrauenswürdig waren. Die Abhängigkeit des Einzelnen von der Gemeinschaft führte so zu einem Gefühl der kollektiven Identität und Loyalität. Wer davon abwich, wurde stigmatisiert oder kam bei Auseinandersetzungen mit Gegnern zu Tode.

Heutzutage kennzeichnen Menschen ihre Gruppenidentität auf vielfältige Weise; ursprünglich jedoch geschah das vorwiegend durch Verhaltensmerkmale, die sich auf eine Reihe von Annahmen stützten: Menschen, die reden wie ich, das Gleiche essen wie ich und auch sonst meine kulturellen Praktiken teilen, gehören wahrscheinlich zu meiner kulturellen Gemeinschaft. Aus solchen Hypothesen erwuchs die Neigung der heutigen Menschen, die kulturellen Praktiken der eigenen Gruppe auszuüben. Kindern beizubringen, wie man Dinge auf die übliche, von der Gruppe definierten Weise tut, wurde zu einer unentbehrlichen Voraussetzung zum Überleben.

Gruppenspezifische Normen werden von Generation zu Generation weitergegeben

Unterricht und Konformität legten auch das Fundament für eine kumulative kulturelle Evolution, in deren Verlauf sich lang bewährte Praktiken oder Produkte verbessern ließen, wobei diese Neuerungen dann im Rahmen der gruppenspezifischen Konventionen, Normen und Institutionen an nachfolgende Generationen weitergegeben wurden. In solche kooperativen Sozialstrukturen hineingeboren, blieb den Individuen nichts anderes übrig, als sich ihnen zu fügen. Zum entscheidenden psychologischen Merkmal avancierte das Gruppenbewusstsein: Die Menschen nahmen die kognitive Perspektive der Gruppe als Ganzes ein, um so für ihr Wohlergehen zu sorgen und sich ihren Gebräuchen anzupassen. Schon bei dreijährigen Kindern konnten wir das beobachten.

Individuen, die zu einem bestimmten Kulturkreis gehörten, mussten sich den herrschenden kulturellen Gebräuchen und sozialen Normen fügen, um so zu demonstrieren, dass sie sich mit der Gruppe und ihren Praktiken identifizieren. Dabei ging es aber auch um mehr als nur um Konformität und Gruppenidentität. Betroffen war ebenfalls das von Frühmenschen geerbte Gefühl für Sympathie und Fairness, das sich zu moralischen Normen weiterentwickelte. Genau wie manche Normen festlegten, wie man etwas bei der Jagd oder bei der Werkzeugherstellung richtig oder falsch machte, so schufen die moralischen Normen Kategorien für den angemessenen Umgang mit anderen Menschen. Die kollektiven Ziele und die gemeinsamen kulturellen Grundlagen der Gruppe schufen eine Perspektive, bei der nicht das »Ich«, sondern das »Wir« zählt. Es entstand die menschliche Moral mit ihrem Sinn für richtig und falsch.

Natürlich kann der Einzelne sich entschließen, gegen eine moralische Norm zu verstoßen. Aber wer von anderen Gruppenmitgliedern zur Ordnung gerufen wird, dem bleibt nur ein begrenzter Spielraum: Er kann die Kritik ignorieren und sich damit außerhalb der gemeinsamen Werte der Gemeinschaft stellen, was möglicherweise zum Ausschluss führt. Für *Homo sapiens* erwiesen sich kulturelle Normen als legitimes Mittel, um die eigenen Impulse unter Kontrolle zu halten und ein Signal der Gruppenidentität auszusenden. Wer von den Normen abwich, musste die mangelnde Kooperationsbereitschaft unter dem Gesichtspunkt gemeinsa-

mer Werte rechtfertigen (etwa: »Ich konnte meinen Pflichten nicht nachkommen, weil ich ein Kind retten musste«). Auf diese Weise verinnerlichten die Menschen nicht nur moralisches Handeln, sondern auch moralische Rechtfertigungen und schufen eine vernunftbasierte moralische Identität.

In meinem Buch »Eine Naturgeschichte der menschlichen Moral« gehe ich von der Annahme aus, dass sich die moralische Psyche des Menschen zum größten Teil evolutionär durch natürliche Selektion erklären lässt. Der springende Punkt: Die Selektion setzte dabei nicht an der physischen, sondern an der sozialen Umwelt an. Während manche evolutionstheoretischen Ansätze sich auf das Prinzip der Gegenseitigkeit und den eigenen Ruf in der Gemeinschaft stützen, betone ich etwas anderes: Die Frühmenschen verstanden, dass sie durch moralische Normen sowohl zum Richter als auch zum Gerichteten wurden. Für jeden Einzelnen war es nicht wichtig, was »die« von mir halten, sondern was »wir« einschließlich meiner selbst von mir denken. Kernstück ist also eine psychologische Orientierung nach dem Motto »Das Wir ist wichtiger als das Ich«. Das verleiht moralischen Vorstellungen ihre außerordentliche Legitimität für die persönliche Entscheidungsfindung.

Für unsere heutige Welt ergibt sich eine besondere Herausforderung aus der Erkenntnis, dass die Anpassungen des Menschen an Kooperation und Moral vorwiegend auf das Leben in kleinen oder innerlich homogenen kulturellen Gruppen abgestimmt waren – Fremde blieben außen vor. Seit dem Aufkommen der Landwirtschaft vor etwa 10000 Jahren bestehen menschliche Gesellschaften jedoch aus Personen mit unterschiedlichem politischen, ethnischen und religiösen Hintergrund.

Deshalb ist nicht mehr ganz so klar, wer zum »Wir« gehört und wer nicht. Daraus erwächst ein Konfliktpotenzial mit zwischenmenschlichen Spannungen innerhalb einer Gesellschaft als auch auf internationaler Ebene – Kriege gelten als Musterbeispiel für Auseinandersetzungen zwischen Eigen- und Fremdgruppe (siehe Teil 6 der Serie im Juniheft). Aber wenn wir als Spezies den größten Herausforderungen begegnen wollen, die alle Gesellschaften der Erde gleichermaßen bedrohen, sollten wir bereit sein, die ganze Menschheit zum »Wir« zu zählen. ◂

QUELLEN

Schmidt, M.F.H., Tomasello, M.: Young children enforce social norms. Current Directions in Psychological Science 21, 2012

Stiner, M. C. et al.: Cooperative hunting and meat sharing 400–200 kya at Qesem Cave, Israel. PNAS 106, 2009

Tomasello, M.: Warum wir kooperieren. Suhrkamp 2010

LITERATURTIPP

Tomasello, M.: Eine Naturgeschichte der menschlichen Moral. Suhrkamp, 2016

Michael Tomasello rekonstruiert die Entstehung des einzigartigen menschlichen Sinns für Werte und Normen.

REAKTIONSDYNAMIK
DAS WACKELN UND ZITTERN DER MOLEKÜLE

Viele chemische Umwandlungen laufen komplizierter ab als bisher angenommen. Das zeigen Computersimulationen, die Molekülschwingungen während einer Reaktion berücksichtigen.



Dean Tantillo ist Professor für Chemie an der University of California in Davis. Er untersucht die komplexen Zusammenhänge chemischer Reaktionen.

⏩ spektrum.de/artikel/1634754

AUF EINEN BLICK
CHEMISCHE WEGGABELUNGEN

1. Während einer chemischen Reaktion durchlaufen Moleküle einen so genannten Übergangszustand: eine Struktur mit einer hohen potenziellen Energie. Bisher nahm man an, dass aus jeder dieser Strukturen genau ein Produkt entsteht.

2. Heute weiß man, dass sich der Reaktionspfad danach noch ein- oder mehrmals gabeln kann (Bifurkation). Aus einem Übergangszustand können so mehrere Produkte entstehen.

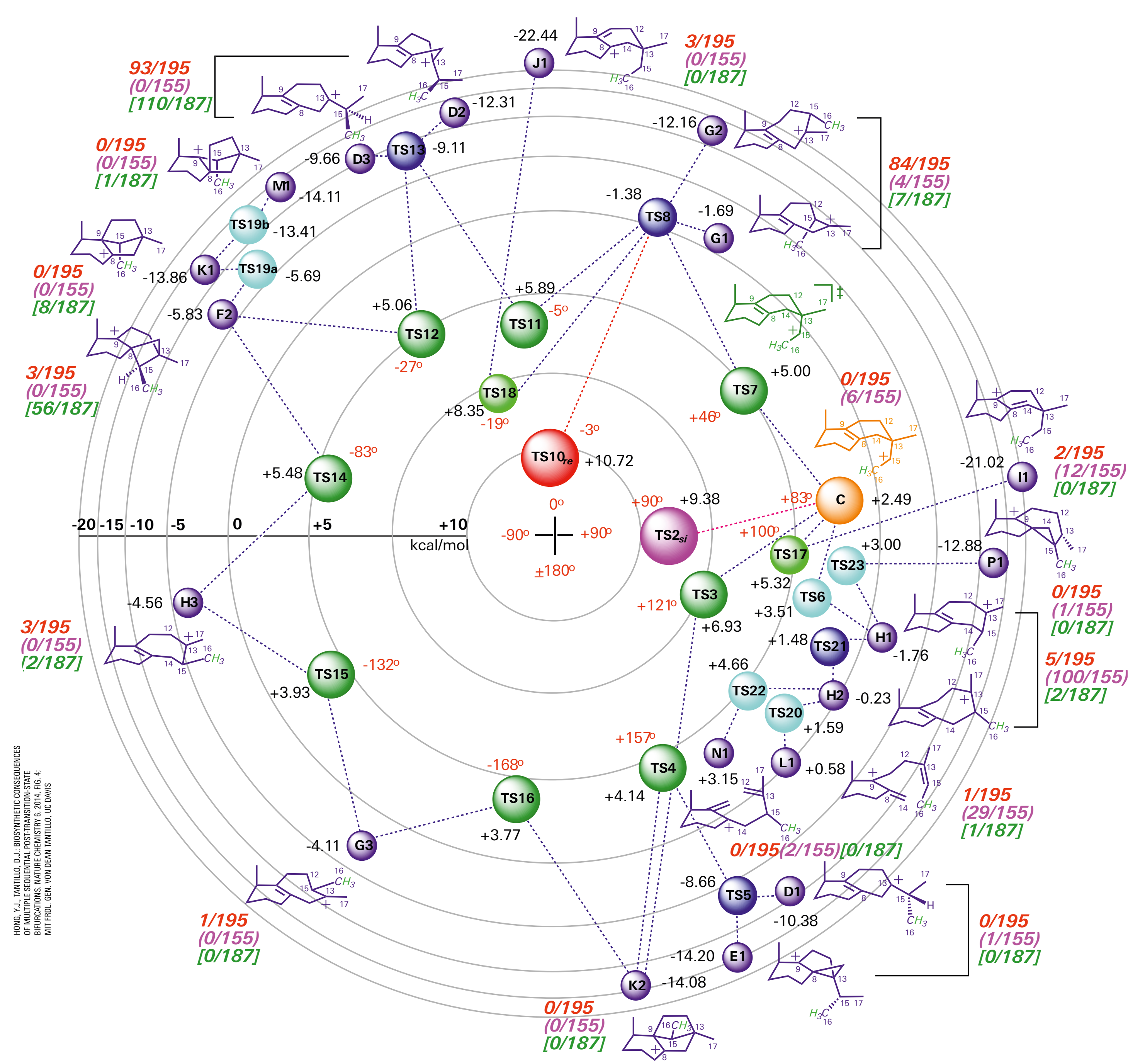
3. Die Schwingungen des Moleküls entscheiden darüber, welchen Weg es an der Weggabelung einschlägt und welches Produkt gebildet wird. Mit diesem Wissen könnte es künftig möglich sein, Reaktionen gezielter zu kontrollieren.

Fährt ein Skifahrer einen Hang hinunter, ist er ständig äußeren Einflüssen wie dem Wind oder vereisten Schneeflächen ausgesetzt. Je nachdem, wie er mit diesen zurechtkommt, verläuft sein Weg bergab, und er wird entsprechend an unterschiedlichen Stellen unten ankommen. Ganz ähnlich können bei einer chemischen Reaktion die Moleküle durch äußere Umstände beeinflusst werden. Während sie sich vom Ausgangsstoff in ein Produkt verwandeln, durchlaufen sie einen Punkt höchster Energie, den so genannten Übergangszustand. Anschließend führt sie ihr Weg – energetisch betrachtet – bergab, ähnlich wie beim Skifahrer. Bisher nahm man an, dass der Pfad dieser chemischen Talfahrt relativ geradlinig verläuft. Doch das ist zu einfach gedacht, denn der Weg kann sich noch mehrmals gabeln. Forscher beginnen jetzt, die Vielzahl dieser molekularen Pfade aufzuzeichnen, um mit Hilfe der so entstehenden Landkarten den Ausgang von Reaktionen besser kontrollieren zu können.

Gängiges Modell im neuen Licht

Im Grundstudium lernen angehende Chemikerinnen und Chemiker normalerweise, dass Reaktionspfade relativ geradlinig von einem Startpunkt über einen Hügel bis zum Ziel verlaufen: Ein oder mehrere Reaktanden, also Ausgangsmoleküle mit niedriger potenzieller Energie, werden in ein Produkt überführt, das ebenfalls eine niedrige potenzielle Energie hat. Der Pfad verläuft über einen Übergangszustand – die Molekülstruktur mit der höchsten potenziellen Energie in dieser Reaktion. Dieser Hügel bildet sozusagen eine energetische Barriere zwischen Reaktanden und Produkten (siehe »Die Kartierung von Reaktionswegen«, S. 43).

Entstehen bei einer Reaktion mehrere Produkte, erklären sich das die Experten bislang mit einem einfachen Modell: In solch einem Fall existieren verschiedene Reaktionswege,



Ein komplexes Reaktionsnetzwerk führt zum Naturstoff Miltiradien. Ausgehend von zwei ersten Übergangszuständen, $TS10_{re}$ (rot) und $TS2_{si}$ (pink), können sich durch Molekülbewegungen zahlreiche weitere Übergangszustände (TS) und daraus Zwischenstufen (C-P) bilden. Nur zwei Strukturen entstehen in substanziellen Mengen: die Carbokationen G1 und G2 (auf 1 Uhr) sowie D2 und D3 (auf 11 Uhr). Letztere sind direkte Vorläufer von Miltiradien.

von denen jeder über einen eigenen Übergangszustand zu genau einem Produkt führt. Die Übergangszustände liegen energetisch unterschiedlich, bilden also verschieden hohe Barrieren, so dass diejenige Reaktion mit der niedrigsten Hürde am schnellsten verläuft und am meisten Produkt ergibt. Doch so manche Produktverhältnisse lassen sich mit diesen einfachen Regeln nicht erklären.

Neuere quantenchemische Untersuchungen zeichnen ein komplizierteres Bild: Reaktionspfade können sich nach einem Übergangszustand gabeln – Fachleute sprechen von einer Bifurkation (englisch: »post-transition state bifurcation«) – und führen dann zu zwei oder mehr Punkten mit niedriger Energie. So entstehen aus einem Übergangszustand mehrere Produkte. Das hat gravierende Auswirkungen für alle, die in irgendeiner Weise Moleküle herstellen oder verändern. Denn dass man Reaktionsprozesse kontrol-

Entscheidende Moleküldynamik

In vielen chemischen Reaktionen bilden sich Produktgemische. Mit Hilfe der hier gezeigten Reaktion werden so genannte ß-Lactone hergestellt, die antimikrobiell wirksam sind. Zu 50 Prozent entsteht dabei ein unerwünschtes Produkt und nur zu 18 Prozent die nützliche Verbindung. Dynamische Berechnungen zeigen, dass sich der Reaktionspfad nach dem Übergangszustand in zwei Wege aufspaltet (Bifurkation). Welchen Weg das reagierende Molekül nimmt, hängt davon ab, wie seine Atome »wackeln und zittern«. Die Moleküldynamik beeinflusst also das Produktverhältnis.

unerwünschtes Nebenprodukt (entsteht zu 50 Prozent)

gewünschtes ß-Lacton (entsteht zu 18 Prozent)

Ausgangsstoff 4-*tert*-Butylcyclohexyldiazomalanat

BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST JAN-FEB 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

lieren und so die Ausbeute an gewünschten Zielmolekülen steigern kann, während unerwünschte Nebenprodukte auf ein Mindestmaß reduziert oder ganz eliminiert werden, ist die Grundlage für alle heutigen chemischen Syntheseverfahren, sei es die Herstellung von medizinischen Wirkstoffen, wichtige Chemikalien, Kunststoffen oder speziellen Materialien, aber beispielsweise auch für die maßgeschneiderte Entwicklung von Enzymen.

Neben den Positionen der Atome werden ihre Massen und Geschwindigkeiten wichtig

Die Erkenntnis, dass sich ein Reaktionsweg gabeln kann, macht auch die traditionelle Sichtweise auf chemische Reaktionen ein Stück komplizierter. So nimmt man vereinfacht an, dass sich Struktur und Energie der Reaktanden gleichmäßig verändern, wenn sie zu Produkten werden. Doch das stimmt nicht ganz: Vielmehr müssen Wissenschaftler die Schwingungsenergie in den reagierenden Molekülen berücksichtigen und ebenso die Art und Weise, wie diese Oszillationen die Abstände und Bindungswinkel zwischen den einzelnen Atomen verändern. Der berühmte Quantenphysiker Richard Feynman (1918–1988) brachte diese Erkenntnis schon früh auf den Punkt: »Alles, was lebende Organismen tun, können wir durch das Gewackel und Gezitter der Atome verstehen.« Doch erst seit Kurzem steht genügend Rechenleistung zur Verfügung, um diese Bewegungen in komplexeren Molekülen quantenchemisch zu modellieren.

Fachleute diskutieren bereits seit ungefähr einem halben Jahrhundert darüber, wie Molekülschwingungen Reaktionsmechanismen beeinflussen. Im Jahr 1970 sagte der theoretische Chemiker Lionel Salem vom französischen Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) voraus, dass die Untersuchung des dynamischen Verhaltens der reagierenden Teilchen immer wichtiger werden würde, um Reaktivität zu erklären. Und der organische Chemiker Barry Carpenter von der englischen University of Bristol präsentiert seit rund 30 Jahren überzeugende Argumente dafür, dass chemische Reaktionen nicht nur hinsichtlich der Positionen ihrer Atome, sondern auch unter dem Gesichtspunkt von deren Massen und Schwingungen betrachtet werden sollten (die so genannte Phase-Space-Perspektive).

Dieses Konzept misst den Geschwindigkeiten und Massen der Atome dieselbe Bedeutung zu wie ihrer Anordnung im Molekül (inklusive der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten ihrer Elektronen). In einer Reaktion mit einer Bifurkation können also die Bewegungen an Stellen des Moleküls, die nicht direkt an der Spaltung und Neubildung von Bindungen beteiligt sind, mit darüber entscheiden, welches Produkt entsteht. Wie das Molekül schwingt, während es sich der »Weggabelung« nähert, ist maßgeblich dafür, welchen weiteren Weg es einschlägt – und somit auch dafür, wo der chemische Skifahrer letztlich ankommt, also welcher Stoff sich bildet.

In Simulationen berechnen theoretische Chemiker nun die Energien verschiedener Schwingungszustände eines Übergangszustands. Diese Oszillationen strecken einzelne Bindungen oder modifizieren Bindungswinkel. Während sich der Übergangszustand dann strukturell dem Produkt nähert, verändern sich mit seiner Struktur auch die Bewegungen der Atome.

Durch solche Berechnungen hat man bereits Antworten auf die Frage bekommen, warum in manchen Reaktionen unerwünschte Nebenprodukte entstehen. Beispielsweise werden seit vielen Jahren so genannte ß-Lactone synthetisch hergestellt. Viele dieser Verbindungen kommen in der

Natur vor und sind zum Teil antimikrobiell aktiv, was sie zu interessanten Kandidaten für Medikamente macht. Will man Moleküle dieser Stoffklasse im Labor herstellen, so erhält man oft Gemische verschiedener Komponenten. Die Reaktion in der Grafik »Entscheidende Moleküldynamik«, links, beispielsweise ergibt nur 18 Prozent des gewünschten ß-Lactons und 50 Prozent eines unerwünschten Stoffs.

Neue Möglichkeiten zur Reaktionskontrolle

Dynamische Berechnungen für diesen Prozess haben gezeigt, dass es entscheidend für den Ausgang einer Reaktion ist, wie die Moleküle »zittern und wackeln«, nachdem sie den Übergangszustand durchlaufen haben. Nach diesem taucht zunächst eine klassische Bifurkation auf: Der Reaktionspfad spaltet sich in zwei Wege, die jeweils zu einem der beiden Produkte führen. Aber gemäß den Simulationen bildet sich je nachdem, wie die Moleküle vibrieren, entweder der eine oder der andere Stoff. In diesem Beispiel bietet die Phase-Space-Perspektive ein unerwartetes Reaktivitätsmodell, mit dem man nun sowohl den Anteil an unerwünschtem Nebenprodukt reduzieren als auch die Ausbeute der begehrten Komponente steigern kann.

Insgesamt nehmen diese Ideen nur langsam Fahrt auf. Obwohl die Moleküldynamik alle chemischen Reaktionen beeinflusst, wurden erst relativ wenige daraufhin untersucht. Daher ist noch unklar, wie viele Prozesse Bifurkationen beinhalten. Doch je mehr über diese Abläufe und deren Spielregeln bekannt ist, desto besser wird es möglich sein, neue Moleküle effizienter herzustellen und komplexe chemische Prozesse der Natur nutzbar zu machen.

Auch in manchen enzymkatalysierten biologischen Reaktionen treten Bifurkationen auf, und diese Abläufe können wichtige Einblicke in Vorgänge in lebenden Organismen geben. Die Pflanze *Salvia miltiorrhiza* (chinesischer Salbei oder Rotwurzelsalbei) beispielsweise wird in der Traditionellen Chinesischen Medizin seit Langem verwendet, um verschiedene Krankheiten von Herzerkrankungen bis zu Hepatitis zu behandeln. Sie stellt durch eine Reihe enzymkatalysierter Reaktionen so genannte Tanshinone her. Inwieweit diese Moleküle der Pflanze nutzen, ist unklar, doch sie sind viel versprechende Kandidaten für Wirkstoffe gegen Krebs oder Herzerkrankungen. Ein einziges Enzym kontrolliert das Reaktionsnetzwerk, welches das Kohlenstoffgerüst dieser Naturstoffe aufbaut. Dieses Netzwerk besitzt die größte bisher entdeckte Anzahl miteinander verbundener Bifurkationen.

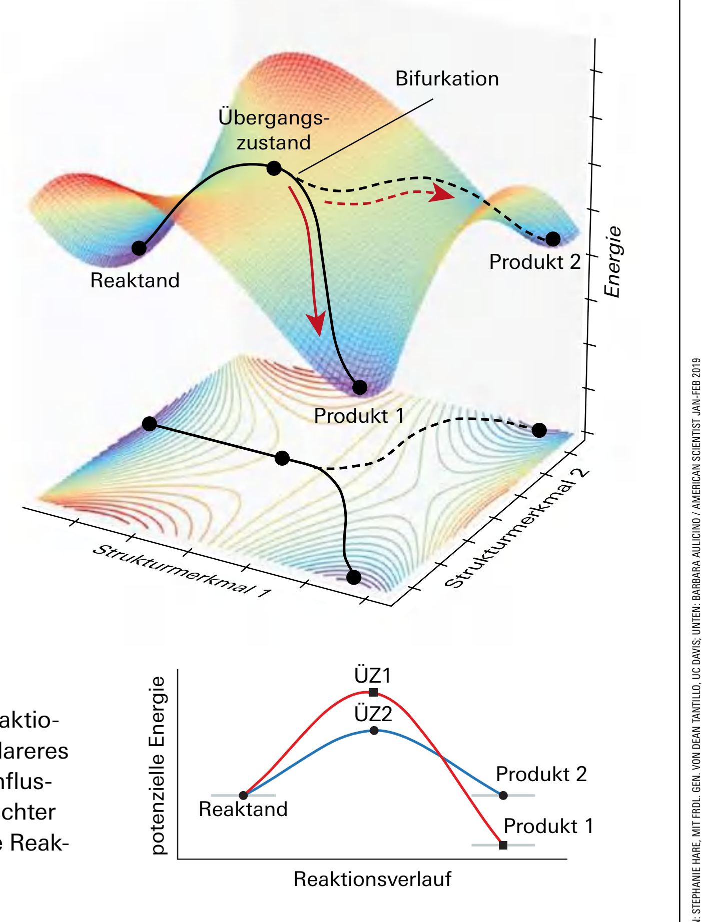
Die Vorstufe der Tanshinone heißt Miltiradien. Dieser komplexe Naturstoff ist aus 20 Kohlenstoffatomen aufge-

Die Kartierung von Reaktionswegen

Bislang haben Chemiker Reaktionswege auf relativ einfache Weise beschrieben, wie die untere Grafik zeigt: Ein Reaktand wird zu einem Produkt und durchläuft dabei einen energetisch höher liegenden Übergangszustand (ÜZ). Entstehen in einer Reaktion verschiedene Produkte, nimmt man an, dass mehrere Übergangszustände existieren (ÜZ1 und ÜZ2).

Dynamische Berechnungen des Reaktionsverlaufs, die quantenchemische Effekte mit einbeziehen, zeigen jedoch, dass Reaktionen ungleich komplizierter ablaufen können (obere Grafik, einschließlich zweidimensionaler Projektion). Reaktionswege mit nur einem einzigen Übergangszustand können sich gabeln – diese Gabelung nach dem Übergangszustand bezeichnen Fachleute als Bifurkation. Die Schwingungen eines Moleküls auf dem Weg zur Gabelung bestimmen, auf welchem Pfad die Reaktion anschließend verläuft und damit, welches Produkt gebildet wird.

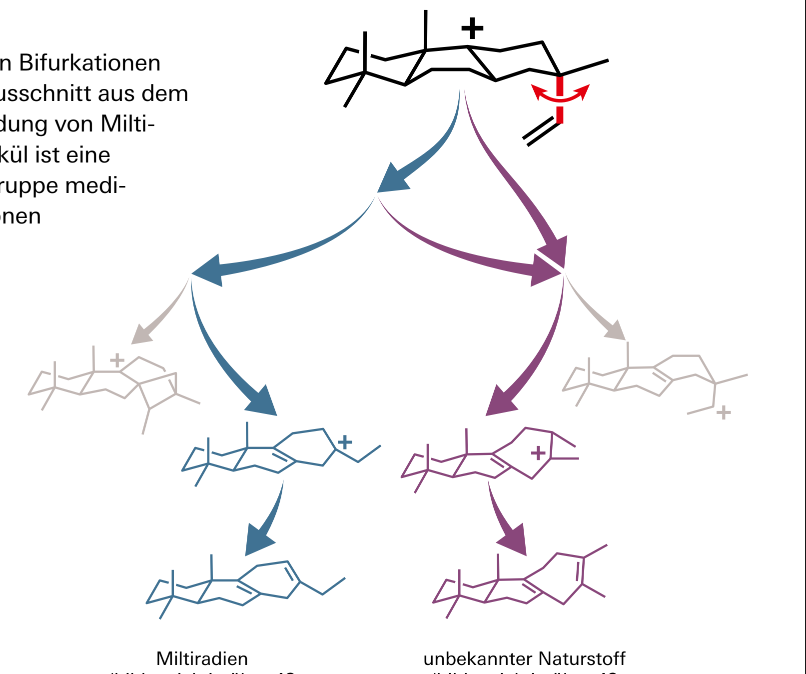
Chemiker haben erst einen kleinen Bruchteil von Reaktionen mit dynamischen Berechnungen untersucht. Ein klareres Verständnis dafür, wie solche Effekte Reaktionen beeinflussen, könnte jedoch dabei helfen, die Ausbeute gewünschter Produkte zu erhöhen und besser nachzuvollziehen, wie Reaktionen in der Natur ablaufen.



OBEN: STEPHANIE HARE, MIT FRDL. GEN. VON DEAN TANTILLO, UC DAVIS; UNTEN: BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST JAN–FEB 2019

Molekülspezifische Vorlieben

Auch enzymkatalysierte Reaktionen können Bifurkationen beinhalten. Hier sieht man einen kleinen Ausschnitt aus dem komplexen Reaktionsnetzwerk, das zur Bildung von Miltiradien führt (siehe Bild, S. 41). Dieses Molekül ist eine Vorstufe so genannter Tanshinone, einer Gruppe medizinisch interessanter Naturstoffe. Simulationen haben gezeigt, dass sich in der Reaktion bevorzugt Produkte bilden, die infolge der Rotation um eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einzelbindung (rot) entstehen. Den Berechnungen zufolge ergeben sich nur zwei der vielen möglichen Produkte in nennenswerten Mengen (blau und violett gegenüber grau) – und zwar, ohne dass man das Enzym, das die Reaktion steuert, berücksichtigt. Eine gewisse Tendenz zu bestimmten Dynamiken ist dem Molekül also immanent. Diese Erkenntnisse könnten helfen, die Funktionsweise von Enzymen genauer zu untersuchen und neue Katalysatoren maßzuschneidern.



BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST JAN–FEB 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

baut und besitzt ein Grundgerüst von drei miteinander verbundenen Ringen. Wie viele andere Reaktionen, die sowohl beim synthetischen als auch beim natürlichen Aufbau solcher Strukturen zum Einsatz kommen, führt die enzymkatalysierte Bildung von Miltiradien über eine positiv geladene Zwischenstufe, die als Carbokation bekannt ist. Solche Zwischenstufen können ihre Kohlenstoffatome umstellen und sich so umfassend neu strukturieren – eine Vielzahl von Molekülen kann entstehen.

Das Molekül bestimmt mit, wo es langgeht

Im Fall von Miltiradien beinhaltete solch eine Umstrukturierung (siehe »Molekülspezifische Vorlieben«, oben) nach unseren energetischen Berechnungen mehrere aufeinander folgende Bifurkationen, so dass ein Übergangszustand viele unterschiedliche Produkte hervorbrachte. Doch als wir die Wackel- und Zitterbewegungen in den Molekülen simulierten, beobachteten wir, dass sich lediglich zwei Stoffe in substanziellen Mengen bilden: die beiden blau und violett hervorgehobenen Kationen. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass das zuerst gebildete Carbokation (schwarz) dazu neigt, Produkte zu bilden, die von einfachen Bewegungen innerhalb des Moleküls herrühren – so zum Beispiel von der Rotation um eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einfachbindung (rot). Darauf weist auch eine weitere Beobachtung hin. In der Natur unterstützt ein Enzym die Bildung von Miltiradien, doch in unseren dynamischen Berechnungen hatten wir das Enzym gar nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass der Enzymkatalysator nicht allein dafür verantwortlich ist, welches Produkt gebildet wird. Vielmehr besitzt der Ausgangsstoff eine eigene Tendenz zu gewissen Bewegungen, die während der Umwandlung zum Ausdruck kommt.

Die Ergebnisse bedeuten aber auch, dass das Enzym gezielt die Bildung des einen möglichen Nebenprodukts aktiv unterdrücken muss – und nicht, wie bislang vermutet, einen Weg unter vielen begünstigen. Mit dieser wichtigen Information können sich die Forscher nun auf die Frage konzentrieren, wie das Enzym genau diesen einen unerwünschten Weg unterbindet.

Wissenschaftler beginnen erst, im Detail zu verstehen, wie die Dynamik von Molekülen deren chemische Reaktionswege beeinflusst. Die Suche ist ein komplexes Unterfangen, doch die Erkenntnisse können ein neues grundlegendes Verständnis dafür schaffen, wie Stoffe miteinander reagieren. Damit könnte es einmal möglich sein, selektivere Syntheserouten für Produkte zu erschaffen oder gezielt Enzymmutationen zu entwerfen, die nützliche, nicht natürlich vorkommende Moleküle herstellen. ◂

QUELLEN

Carpenter, B.K.: Nonstatistical dynamics in thermal reactions of polyatomic reactions. Annual Review of Physical Chemistry 56, 2005

Hare, S.R., Tantillo, D.J.: Cryptic post-transition state bifurcations that reduce the efficiency of lactone-forming Rh-carbenoid C-H insertions. Journal of Chemical Sciences 8, 2017

Hong, Y.J., Tantillo, D.J.: Biosynthetic consequences of multiple sequential post-transition-state bifurcations. Nature Chemistry 6, 2014



FREISTETTERS FORMELWELT
UNENDLICH VIEL BIER NACH FEIERABEND

Selbst wenn zahllose Menschen in eine Kneipe gehen, trinken sie nicht zwingend alle Vorräte leer.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1634756

»Unendlich viele Mathematiker gehen in eine Bar. Der erste bestellt ein Bier. Der zweite ein halbes Bier. Der dritte ein viertel Bier. Der vierte ein achtel Bier. ›Geht mir nicht auf die Nerven‹, sagt der Barkeeper und stellt zwei Bier auf den Tresen.«

Diesen Scherz habe ich Anfang 2018 auf dem Twitter-Account der »Science Busters«, einer Wissenschaftskabarettgruppe, zu deren Ensemble ich gehöre, gepostet. Und selbst mehr als ein Jahr später beschäftigt er die Leser immer noch. Der scheinbare Widerspruch ist gleichermaßen verwirrend und faszinierend. »Nie im Leben reichen zwei Bier für unendlich viele Mathematiker«, antwortete jemand darauf, und selbst eine lange Diskussion konnte ihn nicht vom Gegenteil überzeugen.

Den Witz kann man jedoch über eine geometrische Reihe erklären:

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_0\, q^k = \frac{a_0}{1-q}$$

Diese Formel gilt, wenn q kleiner als 1 und größer als –1 ist. Für die Werte $a_0 = 1$ und $q = 1/2$ ergibt sich die Abfolge aus dem Witz. Man setzt der Reihe nach 0, 1, 2, 3, … für k ein und summiert die Ergebnisse: 1+ ½ + ¼ + ⅛ + … Der Barkeeper kennt schon den Grenzwert dieser Folge, der sich durch die Formel berechnen lässt, und weiß, dass er mit zwei vollen Biergläsern die unendlich vielen Mathematiker bedienen kann. Je größer k wird, desto kleiner wird q^k, und insgesamt wird die Summe nie größer als 2.

Man kann das überraschende Ergebnis aber auch geometrisch veranschaulichen. Stellen wir uns ein Rechteck mit den Seitenlängen 1 und 2 vor, das also den Flächeninhalt 2 hat, und entfernen davon Rechtecke, deren Fläche jeweils den einzelnen Termen der unendlichen Reihe entsprechen.

Der erste Summand ist dann ein Quadrat mit Seitenlänge 1, also genau die Hälfte des Rechtecks. Für den zweiten Term streichen wir eine Fläche der Größe ½, das heißt ein Rechteck mit Seitenlängen 1 und ½, was der Hälfte des verbliebenen Quadrats entspricht. Und auch der dritte Term (¼) halbiert die verbleibende Hälfte; heraus kommt ein Quadrat mit Seitenlänge ½. Das geht ewig so weiter. Jeder folgende Term passt in den übrig gebliebenen Teil des ursprünglichen Rechtecks. Im Grenzfall unendlich vieler Summanden ist das Rechteck komplett beseitigt, so dass sich die Terme insgesamt zu 2 addieren.

Geometrische Reihen findet man nicht nur in wissenschaftlichen Witzen, sondern in vielen Bereichen der Mathematik. Zum Beispiel lässt sich so auch die verwirrende Tatsache erklären, dass 0,99999… gleich 1 ist. Die nicht enden wollende periodische Dezimalzahl ist nämlich nichts anderes als eine geometrische Reihe mit $a_0 = 9/10$ und $q = 1/10$, also die unendliche Summe von 0,9 + 0,09 + 0,009 + … Der Grenzwert, der sich aus der Formel errechnet, beträgt dann 0,9 geteilt durch (1 – 0,1), was nichts anderes als 1 ergibt.

Meist verunsichern uns Unendlichkeiten, weil unser intuitives Verständnis bei niemals endenden Prozessen versagt. In solchen Fällen muss man auf die Mathematik zurückgreifen und akzeptieren, dass die Ergebnisse unseren Erwartungen widersprechen können. Denn manchmal hat selbst die Unendlichkeit ein Ende: im obigen Witz bei zwei Gläsern Bier – obwohl sich manche vielleicht mehr wünschen, um die verwirrenden Aspekte der Unendlichkeit erträglicher zu machen.

ASTRONOMIE

BLICK IN DIE KINDERSTUBE DES KOSMOS

Forscher haben extrem weit entfernte Galaxien aufgespürt, die ein Fenster in eine bislang unbekannte Epoche der kosmischen Frühzeit öffnen.



Dan Coe ist Astronom am Space Telescope Science Institute in Baltimore in den USA. Er ist Chefwissenschaftler des Projekts RELICS, des Reionization Lensing Cluster Survey.

spektrum.de/artikel/1634758

RON MILLER

AUF EINEN BLICK
DIE ERSTEN GALAXIEN

1 Mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskops hat ein Team von Astronomen 300 Galaxien im jungen Universum aufgespürt.

2 Die Forscher machten sich dabei Gravitationslinsen zu Nutze – Regionen mit massereichen kosmischen Objekten, die das Licht weiter entfernter Strahlungsquellen verstärken.

3 Noch immer klafft eine Lücke in der kosmischen Geschichte: Die ersten 400 Millionen Jahre nach dem Urknall werden erst für künftige Teleskope zugänglich.

Riesige Massen wie Galaxienhaufen verformen die Raumzeit. Das Licht dahinterliegender Objekte wird dadurch wie von einer Linse gebündelt. So lassen sich extrem weit entfernte Galaxien beobachten.

RON MILLER

Wir stehen kurz davor, eine vollständige Geschichte des Kosmos niederschreiben zu können. Denn Astronomen haben jetzt Galaxien zu einer Zeit beobachtet, die lediglich 3,5 Prozent des Weltalters von 13,8 Milliarden Jahren entspricht. Das Licht einer dieser Galaxien, ihre Katalogbezeichnung lautet SPT0615-JD, begann seine Reise zur Erde vor unglaublichen 13,3 Milliarden Jahren. Im Jahr 2017 erreichte es das Weltraumteleskop Hubble.

Die Beobachtung stellt eines der Highlights eines Projekts namens RELICS dar (Reionization Lensing Cluster Survey), an dem ich maßgeblich beteiligt war und das einige der ersten Galaxien im Kosmos aufspüren sollte. Zwischen Oktober 2015 und Oktober 2017 nutzte das RELICS-Team dazu mehr als 100 Stunden Beobachtungszeit am Hubble-Teleskop sowie mehr als 900 Stunden Beobachtungszeit am Spitzer Space Telescope.

Insgesamt lieferte uns das Projekt 300 Kandidaten für Galaxien mit einer Entstehungszeit in der ersten Milliarde Jahre nach dem Urknall. Diese extrem weit entfernten Himmelsobjekte sind so faszinierend, weil sie einen Einblick in eine noch völlig unbekannte Ära der kosmischen Geschichte geben. Durch sie können wir etwas darüber lernen, wie die ersten Galaxien entstanden sind und wie sie das junge Universum um sich herum beeinflusst haben.

So gehen wir beispielsweise davon aus, dass Galaxien wie SPT0615-JD das Weltall entscheidend verändert haben: Sie sendeten ultraviolette Strahlung aus, die vermutlich vom umgebenden Gas absorbiert wurde. Das ionisierte neutrale Wasserstoffatome, sie spalteten sich also wieder in Protonen und Elektronen auf.

Astronomen bezeichnen diesen Vorgang als Reionisierung, weil Elektronen und Protonen nach dem Urknall zunächst ebenfalls getrennt voneinander waren, bis der Kosmos weit genug abgekühlt war, um neutrale Atome zu formen. Wie und wann genau die Reionisierung ablief, ist bislang unklar. Mit etwas Glück könnten die Galaxien, die wir im jungen Kosmos beobachten, uns Antworten darauf liefern.

Die frühen Galaxien waren ganz anders als die heutigen, die wir um uns herum sehen. Sie waren homogener und bestanden hauptsächlich aus Wasserstoff, dem leichtesten Element im Kosmos. Im Lauf der Zeit fusionierten dann diese Atome in den Sternen, wodurch sich schwerere Elemente bildeten. Als die ersten Sterne am Ende ihres Lebens in Supernova-Explosionen vergingen, verteilten diese die schwereren Elemente im Weltall, darunter jene Stoffe, die für die Entstehung von Leben nötig sind.

Auch die Struktur der Galaxien war eine andere: Die ersten von ihnen mussten sich noch zu jenen majestätischen Spiralen oder geschwollenen Ellipsoiden entwickeln, die wir im heutigen Kosmos sehen. Sie waren weniger geordnet und viel kleiner – was es schwerer macht, sie aufzuspüren. Die ersten Galaxien, von denen wir bislang wissen, maßen nur etwa ein Prozent unserer Milchstraße. Aber zu dem Zeitpunkt, zu dem wir sie beobachten, wuchsen sie rasant an und bildeten mit einer erstaunlich großen Rate neue Sterne. Diese Pioniere waren massereicher als die heutigen Sterne, sie enthielten vermutlich das Zigfache der Masse unserer Sonne. Kernbrennstoff war damals reichlich vorhanden, da den frühen Galaxien in großen Mengen kaltes Wasserstoffgas zuströmte.

Zudem stießen die Galaxien oft zusammen und verschmolzen miteinander, was ihr Wachstum beschleunigte und zu geradezu explosiver Entstehung neuer Sterne führte. Mit der Expansion des Universums verlangsamte sich das Wachstum der Galaxien dann, Verschmelzungen wurden seltener, und der Zustrom von Gas ebbte ab. Dafür entstanden Planeten und auf mindestens einem von ihnen auch Lebewesen, die sich Gedanken über die Geschichte des Universums machen.

So oder so ähnlich stellen wir uns die Entwicklung des Kosmos vor. Viele Einzelheiten in der fernen Vergangenheit sind aber noch unklar: Wann bildeten sich die ersten Galaxien? Wie groß waren sie, und wie sahen sie aus? Waren sie die »Bausteine« für spätere Galaxien, mit jeweils einer einzigen großen Region, in der Sterne entstanden? Fand in allen von ihnen eine explosionsartige Entstehung von Sternen statt – oder waren manche Galaxien ruhiger, ähnlich wie heutige Exemplare?

Ebenfalls offen ist, ob die damaligen Galaxien Zeit genug hatten, eine scheibenförmige Struktur auszubilden, wie die Milchstraße sie zeigt; möglicherweise kam es dazu auch zu häufig zu Verschmelzungen. Eine spannende Frage ist zudem, ob wir jemals eine Galaxie mit reinem Wasserstoffgas finden werden oder ob die ersten Supernovae die jungen Sterninseln dafür zu schnell mit schwereren Elementen angereichert haben. Andere Unklarheiten betreffen die Rate, mit der die Masse und Anzahl der Galaxien zunahmen, und die Frage, ob sie tatsächlich für die Reionisierung des Universums verantwortlich waren.

Gewaltige Galaxien dienen als kosmische Vergrößerungsgläser

Es gibt also noch viel zu erforschen im jungen Universum. Mit RELICS hofften wir Antworten zu finden. Unser Projekt macht sich so genannte Gravitationslinsen zu Nutze, um weit in die Vergangenheit zu schauen. Dabei handelt es sich um natürliche Vergrößerungsgläser in Form massereicher Galaxienhaufen. Diese Ansammlungen von etlichen Sterninseln enthalten so viel Masse, dass sie mit ihrer Gravitation Raum und Zeit gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein stark verbiegen.

Die Strahlung eines weiter entfernten Objekts folgt den Krümmungen der Raumzeit und wird auf diese Weise gebündelt und verstärkt. Wenn die Strahlung schließlich die Erde erreicht, sieht das Objekt hinter dem Galaxienhaufen verzerrt und auseinandergezogen aus – mitunter erscheinen sogar mehrere Bilder von ihm. Das Phänomen mag abstrakt erscheinen, aber wir kennen etwas Ähnliches aus unserem Alltag: Blickt man durch den Boden eines Weinglases auf eine Kerzenflamme, so sieht man mehrere verzerrte Bilder von ihr. Hier lenkt das Glas die Lichtstrahlen um.

Per Gravitationslinse vergrößerte Galaxien sind heller und zeigen mehr Einzelheiten als solche auf gewöhnlichen Teleskopaufnahmen. Wir können dadurch Objekte beobachten, die sonst zu weit entfernt und zu leuchtschwach wären, um für uns sichtbar zu sein. Ein weiterer Vorteil: In Regionen, die durch den Gravitationslinseneffekt vergrößert



NASA/ESA/STSCI/B. SALMON (PHOTOJOURNAL.JPL.NASA.GOV/CATALOG/PIA22079)

Roter Fleck: Bei dieser schwachen Schliere in einer Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble handelt es sich um SPT0615-JD, eine der am weitesten von uns entfernten bekannten Galaxien.

werden, lassen sich Galaxien effizienter aufspüren als in auf den ersten Blick »leeren« Himmelsflecken, wie sie das Hubble-Teleskop im Rahmen seiner Deep-Fields-Aufnahmen immer wieder anvisiert hat.

Das ist nicht so einfach zu verstehen – zumal der Blick durch eine Gravitationslinse auch einen Nachteil mit sich bringt. Die Verstärkung durch die Gravitationslinse macht einerseits zuvor unsichtbare leuchtschwache Galaxien heller und damit sichtbar. Zugleich aber führt die Vergrößerung per Gravitationslinse dazu, dass wir einen kleineren Bereich des Himmels mit entsprechend weniger Galaxien betrachten. Das reduziert die Chance, eine davon zu finden.

Welcher der beiden Effekte bestimmt nun den Erfolg bei der Galaxienjagd? Wenn es ausreichend viele leuchtschwache Galaxien gibt, dann dominiert der Verstärkungseffekt und kompensiert den Verlust an Fläche über. Glücklicherweise gab es im jungen Universum sehr viele kleine, leuchtschwache Galaxien. Das macht es vergleichsweise unwahrscheinlich, dass wir mit unserer Technik ins Leere blicken.

Drei der umfangreichsten Programme, die in den vergangenen sieben Jahren mit dem Hubble-Teleskop durchgeführt wurden, haben die Gravitationslinsenwirkung von Galaxienhaufen für die Suche nach weit entfernten Galaxien genutzt. Im Rahmen aller dieser Programme haben Wissenschaftler auch Beobachtungen des Weltraumteleskops Spitzer genutzt, das im Infrarotbereich arbeitet, also bei größeren Wellenlängen als Hubble.

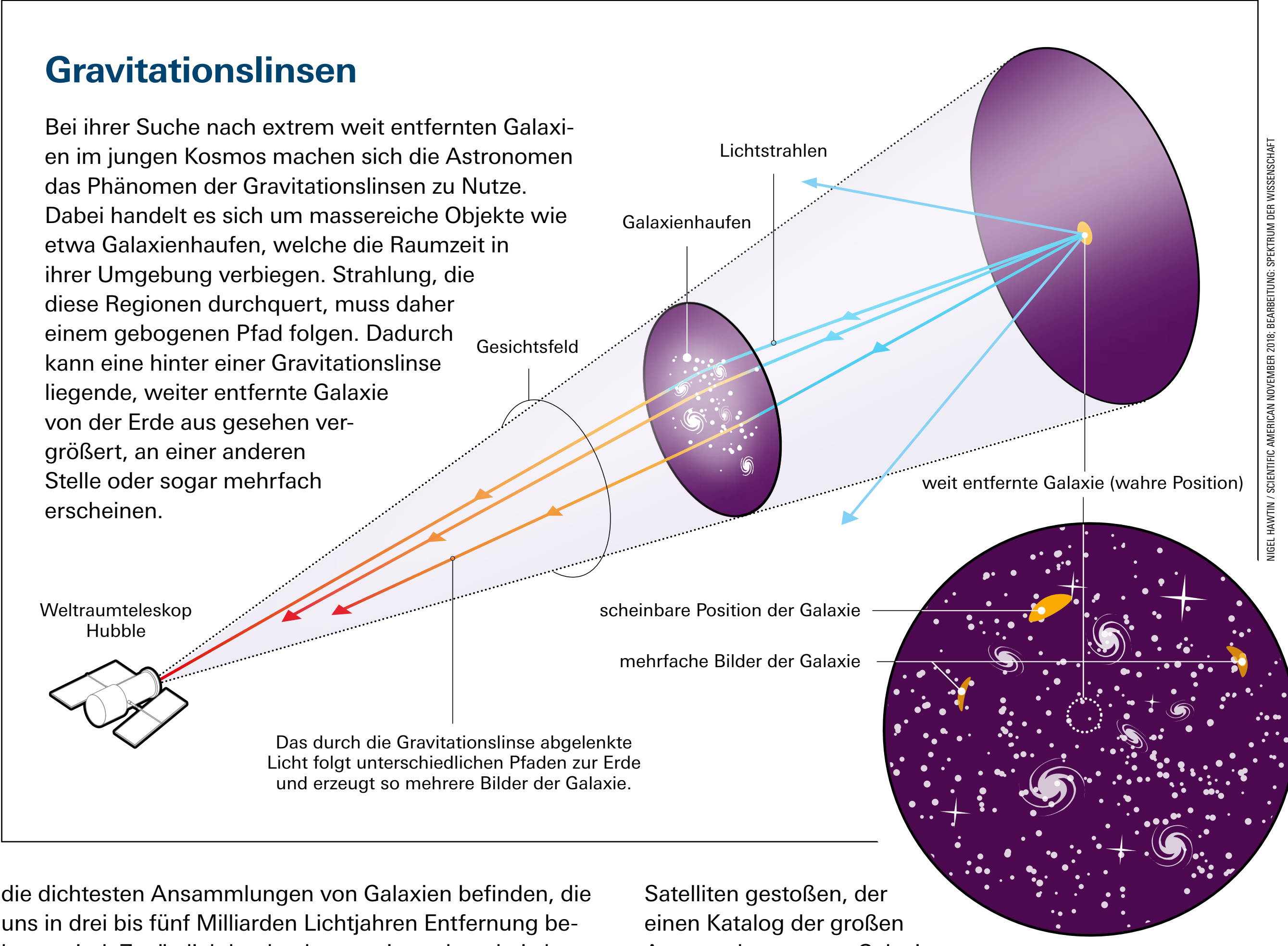
Das erste dieser Programme, der Cluster Lensing and Supernova Survey (CLASH), lief über drei Jahre. Unter der Leitung von Marc Postman beobachtete das Team 25 Galaxienhaufen. Ich half dabei, den Antrag für das Projekt zu schreiben und die gewonnenen Aufnahmen zu analysieren. Dabei entdeckte ich im Jahr 2012 die Galaxie MACS0647-JD, die ihr Licht, das wir heute empfangen, gerade einmal 420 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesendet hat.

Damit war sie eine Weile die am weitesten entfernte bekannte Galaxie, übertroffen erst 2016, als Pascal Oesch von der Yale University eine Galaxie aufspürte, die ihre Strahlung noch einmal 20 Millionen Jahre früher auf den Weg geschickt hat. Oesch gelang die Entdeckung im Rahmen des Cosmic Assembly Near-Infrared Deep Extragalactic Legacy Survey (CANDELS), bei dem das Hubble-Teleskop relativ leere Himmelsregionen absucht, also ohne die Hilfe starker Gravitationslinsen.

Nach den Erfolgen von CLASH half ich dabei, Charles Mattias Mountain, damals Direktor des Space Telescope Science Institute, davon zu überzeugen, beim nächsten großen Hubble-Projekt eine andere Strategie zu fahren. »Frontier Fields« sollte in die Fußstapfen der berühmten Hubble-Deep-Fields-Programme treten, die sich die leersten Regionen am Himmel vorgenommen hatten. In diesen gibt es keine hellen, nahen Galaxien (womit Entfernungen von bis zu mehreren Milliarden Lichtjahren gemeint sind), die unseren Blick in größere Entfernungen behindern könnten.

Das erste Bild des Hubble-Deep-Fields-Programms, eine Kombination von 342 Bildern, aufgenommen im Verlauf von zehn Tagen im Jahr 1995, war eine Offenbarung: In einem vermeintlich leeren Himmelsausschnitt, deren Ausdehnung der Größe eines Sandkorns in einer Armlänge Abstand entspricht, zeigten sich etwa 3000 Galaxien. Das nachfolgende Hubble Deep Field South und das Ultra Deep Field vermieden ebenso sorgfältig alle »nahen« Galaxien und offenbarten eine ähnliche Vielfalt.

Das Frontier-Fields-Programm sollte mit der Tradition der leeren Himmelsflecken brechen. In seinem Rahmen untersuchten Astronomen sechs Himmelsregionen, in denen sich



die dichtesten Ansammlungen von Galaxien befinden, die uns in drei bis fünf Milliarden Lichtjahren Entfernung bekannt sind. Zusätzlich beobachteten sie sechs relativ leere Regionen in der Nachbarschaft der anderen Felder.

Frontier Fields wandelte die vermeintliche Schwäche der störenden Vordergrundobjekte in eine Stärke um: Die Galaxienhaufen im Bild verstärkten die Fähigkeiten der beiden Teleskope Hubble und Spitzer mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts, so dass die Teleskope viele weit entfernte Galaxien aufspüren konnten – darunter die kleinsten und leuchtschwächsten Galaxien, die wir bisher kennen.

Relikte der Vergangenheit

Nachdem CLASH und Frontier Fields bereits liefen, war zunächst unklar, ob die Gemeinschaft der Astronomen ein weiteres großes Hubble-Projekt zur Beobachtung von Galaxienhaufen befürworten würde. Doch viele massereiche Galaxienhaufen waren bis dahin weder mit Hubble noch im Infrarotlicht beobachtet worden. Und just in diesem Bereich des elektromagnetischen Spektrums sollte man besonders ferne Galaxien aufspüren können. Schließlich wird die Wellenlänge von Strahlung durch die Expansion des Weltalls ständig gestreckt, was bei sichtbarem Licht einer Verschiebung hin zum Infraroten gleichkommt.

Die Galaxienhaufen stellten also gewissermaßen eine Reihe natürlicher Teleskope dar – und wir hatten uns bei unserer Suche nach fernen Galaxien bislang nicht die Mühe gemacht, durch sie hindurchzuschauen. Auf die Galaxienhaufen war ich 2015 durch Daten des europäischen Planck-Satelliten gestoßen, der einen Katalog der großen Ansammlungen von Galaxien erstellt hatte. Planck ist zwar eher für seine detailreiche Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung berühmt. Doch Galaxienhaufen verzerren diese Hintergrundstrahlung, daher konnten die Wissenschaftler anhand der Planck-Messungen rund 1000 von ihnen aufspüren.

Die meisten dieser Ansammlungen waren zwar bereits bekannt, bei einigen handelte es sich jedoch um neue Entdeckungen. Der massereichste Galaxienhaufen in dem Katalog, Abell 2163, war nur mit Hubble im sichtbaren Bereich beobachtet worden, nicht aber im Infraroten. Und auch der Galaxienhaufen mit der zweitgrößten Masse, PLCK G287.0+32.9, aus dem Planck-Katalog sah sehr viel versprechend aus: Er hatte sich schon bei Beobachtungen mit Teleskopen auf der Erde als exzellente Gravitationslinse entpuppt. Aber das Weltraumteleskop Hubble hatte dort noch nicht hingeschaut.

Ich erstellte also eine Liste von 41 massereichen Galaxienhaufen, von denen es noch keine Hubble-Aufnahmen im nahen Infrarotbereich gab, und schrieb zusammen mit einem Team von Astronomen einen Hubble-Projektantrag. Wir baten um Beobachtungszeit für 190 von Hubbles Umläufen um die Erde. Das entspricht etwa fünf Prozent der verfügbaren Beobachtungszeit für das Antragsjahr – insgesamt mehr als 100 Beobachtungsstunden.

Nachdem alle Projektvorschläge für das Jahr eingereicht waren, versammelten sich Astronomen aus der ganzen

Welt in Baltimore, um darüber zu beratschlagen. Unser Team hatte Glück: Im Juni 2015 erfuhren wir, dass unser Vorschlag angenommen worden war. Es war das größte »General Observers«-Projekt im 23. wissenschaftlichen Betriebsjahr des Weltraumteleskops.

Im Rahmen von RELICS beobachteten wir alle 41 Galaxienhaufen auf unserer Liste im infraroten Kanal der Wide Field Camera 3 (WFC3/IR) von Hubble. Außerdem betrachteten wir mit Hubbles Advanced Camera for Surveys (ACS) die Objekte im roten, grünen und blauen sichtbaren Licht, sofern das nicht zuvor geschehen war. Die ACS-Aufnahmen haben eine höhere Auflösung und helfen uns damit, die Linseneigenschaften der Galaxienhaufen zu messen und daraus die Vergrößerung der auf den WFC3/IR-Bildern entdeckten, weit entfernten Galaxien abzuschätzen.

Wir beobachteten bei sieben verschiedenen Wellenlängen zwischen 0,4 und 1,7 Mikrometern und erhielten auf diese Weise grobe Spektren der Galaxienstrahlung. Indem wir auf spezifische Strukturen im Spektrum achteten, beispielsweise auf die Absorption durch neutralen Wasserstoff, konnten wir die Rotverschiebung der Strahlung und damit die Entfernung der Galaxien abschätzen.

Weitere Projektanträge brachten uns zusätzliche 946 Stunden Beobachtungszeit am Infrarot-Weltraumteleskop Spitzer ein. Da es andere Wellenlängen erfasst als Hubble, konnten wir mit ihm die Sterne in den Galaxien genauer charakterisieren und auch ihre Gesamtmasse bestimmen. Daneben überprüften wir, ob die Galaxien wirklich so weit entfernt sind, wie es anhand der Hubble-Aufnahmen scheint.

Eine einzigartige Entdeckung

Unserem Postdoc Brett Salmon gelang dann die wohl wichtigste Entdeckung: Er stieß auf SPT0615-JD. Die Galaxie stach auf den Hubble-Aufnahmen keineswegs sofort als das einzigartige Objekt hervor, das es ist. Galaxien können aus unterschiedlichen Gründen einen Rotstich haben. Einige von ihnen sind stark rotverschoben wie eben SPT0615-JD. Andere sind lediglich in dichte Staubwolken gehüllt, die ihr blaues Licht absorbieren und im infraroten Bereich wieder aussenden. Dadurch erscheinen sie röter, als sie eigentlich sind.

Wieder andere rote Galaxien befinden sich in unserer lokalen Umgebung, sind aber sehr alt. In ihnen haben sich in jüngerer Zeit nicht mehr viele neue Sterne gebildet; dadurch dominieren alte Sterne, die vor allem rot leuchten. Bei roten Galaxien auf Teleskopbildern können sogar alle diese Faktoren zusammen auftreten: Sie sind mitunter rotverschoben, staubig und zum Zeitpunkt der Aufnahme schon ziemlich alt.

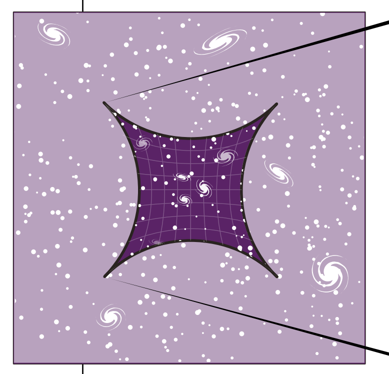
Deshalb sind Spitzer-Beobachtungen im Infrarotbereich bei Wellenlängen von drei bis fünf Mikrometern so wichtig für uns: Mit ihnen lassen sich ferne, stark rotverschobene Galaxien von nahen, intrinsisch roten Galaxien unterscheiden. Tatsächlich stießen wir auf den Hubble-Aufnahmen zunächst auf drei Kandidaten – darunter SPT0615-JD –, die eine Rotverschiebung mit einem Wert von 10 zu haben schienen. Das entspricht auf den ersten Blick einer Zeit, als das Universum weniger als 500 Millionen Jahre alt war. Beobachtungen mit Spitzer zeigten uns jedoch, dass die Rotverschiebung von zwei dieser Kandidaten vermutlich lediglich 2 beträgt. Damit hätte ihr Licht »nur« etwa zehn Milliarden Jahre zu uns benötigt, was etwa drei Vierteln des jetzigen Weltalters entspricht. Lediglich SPT0615-JD überstand den Spitzer-Test und verblieb als Kandidat für einen neuen Entfernungsrekord.

Durch die Kombination von Salmons Auswertung der Hubble-Daten mit einer Analyse der Spitzer-Messungen durch Victoria Strait von der University of California in Davis konnten wir zeigen, dass die Intensität der Strahlung von SPT0615-JD bei einer Wellenlänge von etwa 1,34 Mikrometern schlagartig abfällt. Bei kleineren Wellenlängen ist die Galaxie nicht mehr zu sehen. Die fehlende Strahlung, so unsere Vermutung, hat den Wasserstoff im jungen Kosmos reionisiert.

Die Abbruchkante im Spektrum von SPT0615-JD ist für uns ausgesprochen nützlich: Sie erlaubt uns, die Entfernung der Galaxie zu bestimmen. Zwar sehen wir die Kante bei 1,34 Mikrometern. Aber wir wissen aus der Atomphysik, dass neutraler Wasserstoff eigentlich ganz anderes Licht absorbiert, nämlich extreme ultraviolette Strahlung mit Wellenlängen kleiner als 0,12 Mikrometer. Der Vergleich zwischen dieser ursprünglichen und der beobachteten

Zwei unterschiedliche Strategien

Für ihre Suche nach weit entfernten Galaxien können Astronomen zwei verschiedene Verfahren anwenden. Beim ersten machen sich die Wissenschaftler Langzeitaufnahmen von vermeintlich leeren Himmelsregionen zu Nutze. Beim zweiten beobachten sie gerade solche Regionen, in denen sich Galaxienhaufen befinden, und nutzen diese als Gravitationslinse, die Licht dahinterliegender Quellen bündelt. Wegen der Vergrößerung betrachtet man so zwar einen kleineren und seltsam geformten Himmelsausschnitt, kann aber Galaxien aufspüren, die sonst zu leuchtschwach wären.



leeres Feld

durch eine Gravitationslinse beobachtetes Feld

NIGEL HAWTIN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Absorptionskante im Spektrum von SPT0615-JD zeigte uns daher, wie stark sich das Universum zwischen der Aussendung der Strahlung und ihrem Empfang auf der Erde ausgedehnt hat, und damit auch, wie lange die Strahlung zu uns unterwegs war.

So kommen wir auf die rekordverdächtige Rotverschiebung von 10. Damit ist SPT0615-JD eine der am weitesten entfernten Galaxien, die wir kennen. Es gibt zwar zwei Galaxien, die eine Rotverschiebung von 11 besitzen, die also etwas weiter entfernt sind und wohl bereits 400 Millionen Jahre nach dem Urknall existierten. Hubble zeigt sie allerdings lediglich als infrarote Punkte, die zu klein sind, um Einzelheiten ihrer Struktur zu erkennen.

Bei SPT0615-JD ist das anders: Ihr Licht wurde durch eine Gravitationslinse verzerrt, was das Bild der Galaxie vergrößert hat (siehe Bild S. 49). Dadurch können wir einen detaillierteren Blick auf diese ferne Verwandte unserer Milchstraße werfen. Unsere Beobachtungen mögen hier nicht allzu viel an Details hergeben, aber wir wollen nun mit dem Hubble-Teleskop noch aussagekräftigere Bilder machen.

Unter anderem hoffen wir, auch die durch die Gravitationslinse erzeugten Abbilder der Galaxie aufzuspüren, wie sie Rachel Paterno-Mahler von der University of California in Irvine vorhergesagt hat. Darüber hinaus konnten wir uns bereits Beobachtungszeit am Atacama Large Millimeter Array (ALMA) im chilenischen Hochland sichern. Damit wollen wir unsere Entfernungsmessung bestätigen und zudem Sauerstoff in der Galaxie nachweisen – das wäre der bislang früheste Nachweis dieses Elements im Kosmos.

Und schließlich werden wir Beobachtungen mit dem James Webb Space Telescope (JWST) vorschlagen, dem nächsten großen Weltraumteleskop der NASA, dessen

Kosmische Zeitleiste

Das Projekt RELICS nutzte die Weltraumteleskope Hubble und Spitzer, um nach Galaxien in der Zeit zwischen 400 und 600 Millionen Jahren nach dem Urknall zu suchen. Astronomen bezeichnen diese Ära als Epoche der Reionisierung, weil die ersten Sterne mit ihrer Strahlung die neutralen Wasserstoffatome im Weltall wieder ionisierten. Da sich elektromagnetische Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, ist der Blick in große Entfernungen zugleich ein Blick in die ferne Vergangenheit.

Eine herausragende Entdeckung von RELICS war die Galaxie SPT0615-JD, deren Licht 13,3 Milliarden Jahre zur Erde benötigte – wir sehen sie also so, wie sie damals aussah.

vor 13,3 Milliarden Jahren: Galaxie SPT0615-JD, Rotverschiebung 10
dunkles Zeitalter
Epoche der Reionisierung
kosmische Hintergrundstrahlung
kosmische Inflation
Urknall
12 Mrd. Jahre
?
10 Mrd. Jahre
8 Mrd. Jahre
6 Mrd. Jahre
4 Mrd. Jahre
2 Mrd. Jahre
beschleunigte Expansion
heute
Spitzer
Hubble
20
10
3
2
ultraviolette Strahlung
1
0
infrarote Strahlung
heute
Urknall
0 1 2 3 20

Die Rotverschiebung

Während das Weltall expandiert, dehnt sich auch die Strahlung aus, die sich durch den Kosmos bewegt. Dadurch verschieben sich die Wellenlängen vom blauen zum roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Je weiter ein Objekt von der Erde entfernt ist, desto länger nimmt seine Strahlung an der Expansion teil und desto größer ist daher seine Rotverschiebung.

NIGEL HAWTIN / SCIENTIFIC AMERICAN NOVEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Start wegen technischer Probleme nach derzeitigem Stand allerdings frühestens 2021 ansteht. Das JWST könnte uns einen Einblick in die innere Struktur der Galaxie liefern, ihren Beitrag zur Reionisierung messen und ihre chemische Zusammensetzung bestimmen – ob sie also noch aus reinem Wasserstoffgas besteht oder bereits mit schwereren Elementen angereichert ist.

SPT0615-JD war die wichtigste Entdeckung von RELICS, aber wir haben darüber hinaus rund 300 weitere Kandidaten für sehr frühe Galaxien gefunden. Alle von ihnen müssen noch durch Nachfolgebeobachtungen überprüft werden. Im Rahmen unseres Projekts entdeckten wir außerdem die bislang hellsten bekannten Galaxien bei Rotverschiebungen mit einem Wert von 6, was einem Universumsalter von etwa einer Milliarde Jahren entspricht.

Die Lücke in unserer Geschichte

Die frühen Galaxien könnten uns letztlich dabei helfen, ein fehlendes Kapitel im Geschichtsbuch des Universums zu füllen. Wissenschaftler haben zwar eine grundlegende Theorie über die ersten Momente nach dem Urknall, als sich der Kosmos vermutlich durch ein als Inflation bezeichnetes Phänomen für einen kurzen Moment mit gewaltiger Geschwindigkeit aufblähte. Und etwa 380 000 Jahre nach der Entstehung von Raum und Zeit hatte sich das Universum ausreichend abgekühlt, um die Bildung der ersten Atome zu ermöglichen, wodurch der Kosmos erstmals für Licht durchsichtig wurde. Das Nachglühen dieser Epoche ist bis heute in der kosmischen Hintergrundstrahlung verewigt.

Auf diesen Schnappschuss folgt dann jedoch eine 400 Millionen Jahre große Lücke in unserem Wissen. Bislang haben wir kein einziges Objekt in dieser Epoche aufspüren können. Drei Prozent der kosmischen Saga liegen damit völlig im Dunkeln. Wir wissen allerdings, dass diese Epoche ereignisreich gewesen sein muss. Die ersten Sterne entstanden wohl 100 Millionen Jahre nach dem Urknall. Anschließend begannen sie wahrscheinlich damit, immer größere Ansammlungen zu bilden, aus denen schließlich die ersten Galaxien hervorgingen. Das Licht dieser Galaxien reionisierte dann den Wasserstoff im Universum.

Anhand der ersten Galaxien können wir vielleicht etwas über diese Prozesse lernen. Mit RELICS und ähnlichen vorangegangenen Projekten– wie etwa CLASH, CANDELS und Frontier Fields – haben wir zweifellos Fortschritte gemacht. Wenn erst das JWST im All ist, hoffen wir auf einen noch größeren Sprung. Es wird dann das leistungsstärkste Instrument der Menschheit zur Untersuchung der frühesten Epochen des Kosmos sein. Es wird leuchtschwächere, weiter entfernte Galaxien bei größeren Wellenlängen und mit höherer Auflösung beobachten als alle bisherigen Teleskope. Und wir sollten mit dem JWST in der Lage sein, die Massen und die chemische Zusammensetzung der Galaxien sowie ihren Beitrag zu Reionisierung zu bestimmen.

Gravitationslinsen haben uns bereits mit den gegenwärtigen Teleskopen geholfen, weit entfernte Galaxien aufzuspüren. Dieser Vorteil wird bei den Beobachtungen mit dem JWST bei höheren Rotverschiebungen sogar noch größer. Je weiter wir in der Zeit zurückblicken, desto stärker dominieren kleinere Systeme die Verteilung der Galaxien. Wenn sich dieser Trend bis in die ersten 400 Millionen Jahre fortsetzt, vergrößert sich der Vorteil von Gravitationslinsen noch einmal ganz erheblich. Auf Basis derzeitiger Schätzungen wage ich vorauszusagen, dass Gravitationslinsen das entscheidende Element für die Entdeckung der allerersten Galaxien mit dem JWST sein werden.

Mit Sicherheit wird das JWST Galaxien zu einer Zeit von 300 Millionen Jahren nach dem Urknall sehen. Womöglich werden Gravitationslinsen es uns dann sogar ermöglichen, junge Galaxien 200 Millionen Jahre nach dem Urknall aufzuspüren. Das halbiert die Lücke in der kosmischen Geschichte, zumindest sofern Galaxien tatsächlich so früh entstanden sind.

Nach dem Start des Teleskops müssen wir uns mit diesem Vorhaben beeilen. Wir haben lediglich fünf bis zehn Jahre Zeit, um mit dem Instrument zu arbeiten. Während das Hubble-Teleskop 28 Jahre nach seinem Start – trotz kleiner Altersschwächen – immer noch gute Arbeit leistet, hat das JWST bloß Treibstoff für ein Jahrzehnt an Bord. Danach können wir es nicht mehr auf seiner Umlaufbahn am Lagrange-Punkt L2 halten, der 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt liegt und damit fast viermal so weit entfernt ist wie der Mond. Damit ist das Teleskop praktisch unerreichbar für Astronauten – Reparaturmissionen oder der Austausch von Instrumenten wie bei Hubble sind kaum denkbar.

James Webb wird noch weiter zurückblicken

In einer Hinsicht sind die bisherigen Ergebnisse besonders spannend für uns: Die Milchstraße ist vermutlich etwa zur gleichen Zeit entstanden wie SPT0615-JD. Doch wir sehen unsere Galaxie nur so, wie sie heute ist, und wir haben keine Möglichkeit zu erfahren, wie sie im jungen Kosmos ausgesehen hat. Im Gegensatz dazu sehen wir SPT0615-JD in ihrer Jugend, weil das Licht dieser Galaxie so lange zu uns brauchte. Unsere Milchstraße und SPT0615-JD könnten letztlich eine ganz ähnliche Geschichte haben. Beide sind im Verlauf von 13 Milliarden Jahren immer weiter angewachsen. Und auch in SPT0615-JD sind wahrscheinlich rund um Sterne Planeten entstanden – auf einigen dieser Planeten vielleicht sogar Leben.

Falls eine dieser Lebensformen Intelligenz entwickelt hat, schaut sie womöglich gerade mit Teleskopen durch denselben Galaxienhaufen hindurch und sieht einen schwach leuchtenden roten Fleck – ein vergrößertes Bild der Milchstraße kurz nach ihrer Geburt. Das ist wohl einer der Hauptgründe, warum wir immer weiter in die Tiefen des Kosmos und zurück in die Zeit blicken: um unsere Ursprünge zu erforschen und unsere Rolle im Kosmos zu ergründen. ◂

QUELLEN

Oesch, P.A. et al.: A remarkably luminous galaxy at z = 11.1 measured with Hubble space telescope grism spectroscopy. The Astrophysical Journal 819, 2016

Salmon, B. et al.: RELICS: a candidate z ~ 10 galaxy strongly lensed into a spatially resolved arc. The Astrophysical Journal Letters 864, 2018



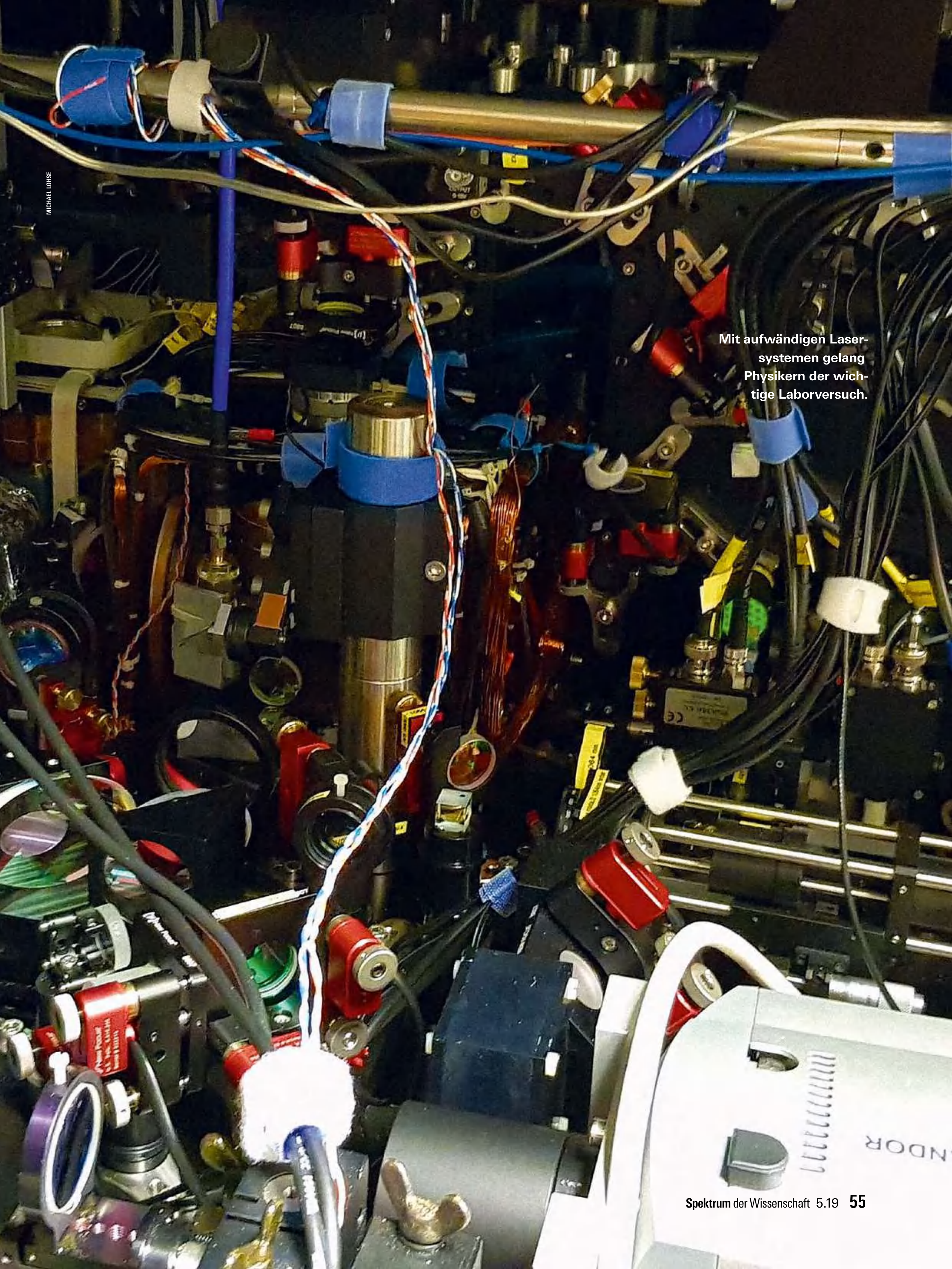
MICHAEL LOHSE

QUANTENPHYSIK
AUFBRUCH IN NEUE DIMENSIONEN

Dank ausgeklügelter Tricks haben Physiker den vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt im Labor nachgewiesen.

Michael Lohse ist promovierter Physiker und war an dem beschriebenen Versuch beteiligt. Er arbeitet inzwischen als Patentingenieur bei einer Kanzlei in München.

▸ spektrum.de/artikel/1634760



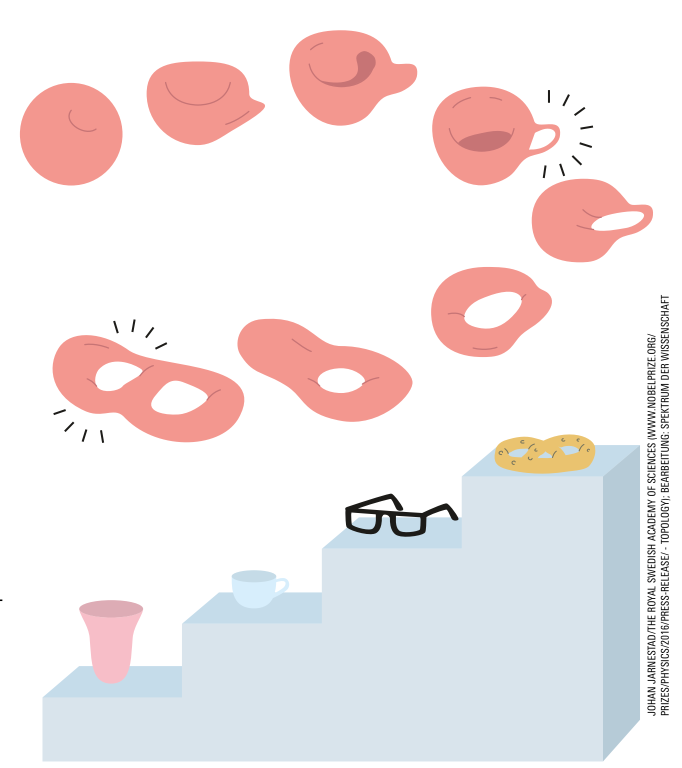
MICHAEL LOHSE

Mit aufwändigen Lasersystemen gelang Physikern der wichtige Laborversuch.

Viele Menschen haben vermutlich erstmals durch die berühmte Geschichte des Quadrats A. Square einen greifbaren Eindruck von Räumen mit mehr als drei Dimensionen bekommen. Neben einer satirischen Darstellung der damaligen viktorianischen Gesellschaftsstruktur in England beschreibt Edwin Abbott Abbott in seiner 1884 erschienenen Novelle »Flächenland«, wie der quadratische Protagonist einer flachen Welt auf eine Kugel trifft, die ihn von der Existenz einer dritten Dimension überzeugen will.

Für Mathematiker ist es nichts Besonderes mehr, sich geistig in hochdimensionale oder gar unendlich-dimensionale Räume zu begeben, um dort komplizierte Beweise zu führen. Und selbst in manchen Bereichen der Physik ist es mittlerweile an der Tagesordnung, an Objekte mit mehr als drei Dimensionen zu denken.

Außerhalb dieser theoretischen Sphären und vor allem, wenn es um das alltägliche Leben geht, ist nach drei Raumdimensionen allerdings Schluss. Gerade Experimentalphysiker, die Theorien im Labor überprüfen, sind auf Systeme mit maximal drei Dimensionen beschränkt. Doch nun ist es mir mit meinen Kollegen gelungen, einen vierdimensionalen Quanteneffekt experimentell zu untersuchen.



JOHAN JARNESTAD/THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES (WWW.NOBELPRIZE.ORG/PRIZES/PHYSICS/2016/PRESS-RELEASE/ - TOPOLOGY); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In der Topologie klassifizieren Mathematiker Objekte gemäß ihrer unveränderlichen Eigenschaften. Für geometrische Formen bietet sich etwa die Anzahl ihrer Löcher an. Eine Tasse und ein Donut gehören daher zur gleichen topologischen Kategorie. Ein abstrakteres Beispiel ist die »Chern-Zahl«, die das Verhalten der Elektronen im Quanten-Hall-Effekt charakterisiert. Die Hall-Spannung hängt lediglich von dieser Zahl ab.

Die seltsamen Gesetzmäßigkeiten, denen mikroskopische Teilchen folgen

Die klassische Physik, die wir in unserer Welt wahrnehmen, unterscheidet sich drastisch von den Gesetzen, die das Verhalten von Molekülen und anderen Teilchen auf atomarer und subatomarer Ebene diktieren. Der Grund dafür ist, dass Quantensysteme in der Regel ihre eigentümlichen Merkmale verlieren, sobald sie mit ihrer Umgebung wechselwirken. Ein alltägliches Objekt wie ein Ball hat gar keine Chance seine quantenmechanischen Eigenschaften zu entfalten: Er ist von unzählbar vielen Luftmolekülen umgeben, wird von Photonen bombardiert und kommt hin und wieder in Berührung mit einem Fuß.

Das macht es für Physiker schwer, die Quantenwelt zu erkunden. Meist können sie nur wenige Teilchen in abgeschotteten Systemen untersuchen, die äußerst störanfällig sind. Die kleinste Temperaturschwankung oder eine leichte Vibration machen das ganze Experiment zunichte.

Eine bemerkenswerte Ausnahme ist der so genannte Quanten-Hall-Effekt (siehe **Spektrum** März 1986, S. 46), den der deutsche Physiker Klaus von Klitzing 1980 erstmals beobachtete. Das Quantenphänomen ist in Festkörpern messbar, die aus mehr als 10^{23} Teilchen bestehen, und ist unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Diese Entdeckung sollte weitaus weitreichendere Folgen für die Physik haben, als es der Forscher oder das Nobelkomitee, das ihm 1985 den prestigeträchtigen Preis verlieh, ahnen sollten. Denn Quanten-Hall-Systeme sind das erste Beispiel einer neuen Stoffklasse, welche die heutige Elektronikindustrie revolutionieren und zu neuartigen Quantencomputern führen könnte: Sie gehören zu den topologischen Materialien (siehe **Spektrum** Februar 2019, S. 50).

Als von Klitzing seine überraschende Beobachtung machte, war ein ähnliches Phänomen bereits bekannt, der nach seinem Entdecker Edwin Hall benannte klassische Hall-Effekt: Führt man einen stromdurchflossenen Leiter in ein Magnetfeld, lenkt die Lorentzkraft die bewegten Elektronen seitlich ab, so dass eine Spannung senkrecht zum angelegten Strom entsteht. Diese »Hall-Spannung« hängt sowohl von der Elektronendichte des Materials als auch von der Stärke des äußeren Magnetfelds ab, weshalb der Hall-Effekt zum Vermessen magnetischer Felder genutzt wird.

Klaus von Klitzing führte ein ähnliches Experiment durch, um eine künstlich hergestellte Halbleiterstrukur zu untersuchen: die so genannten MOSFETs, deren freie Elektronen in einer zweidimensionalen Ebene eingeschlossen sind. Als der Forscher die Proben in einem extrem starken Magnetfeld immer weiter herunterkühlte, stellte er überrascht fest, dass die Hall-Spannung nicht mehr kontinuierlich mit der Feldstärke zu- oder abnahm, sondern ihren Wert ruckartig änderte.

Dieses unstetige Verhalten ist eigentlich ein Merkmal von Quantensystemen. Doch von Klitzing verwendete makroskopische und vergleichsweise unreine Halbleiter, in denen sich quantenmechanische Effekte eigentlich nicht beobachten lassen. Als er den Versuch für andere MOSFETs wiederholte, fand er exakt die gleichen Messwerte

vor – und das, obwohl die Hall-Spannung von der Elektronendichte einer Probe abhängen sollte. Seine Ergebnisse ließen sich dagegen ausschließlich auf Naturkonstanten zurückführen. Diese erstaunliche Eigenschaft nutzt man inzwischen, um den elektrischen Widerstand zu definieren.

Zwei Jahre nach der unerwarteten Entdeckung fand der britische Physiker David Thouless mit seinen Kollegen Mahito Kohmoto, Peter Nightingale und Marcel den Nijs eine Erklärung für das sonderbare Verhalten der Elektronen: Anders als in gewöhnlichen Festkörpern diktieren Gesetze aus dem abstrakten Gebiet der Topologie das Verhalten der Teilchen in Quanten-Hall-Systemen.

Die Topologie stammt aus der Mathematik und dient der Klassifizierung geometrischer Körper. Dabei gelten zwei Objekte als gleich, wenn sie sich kontinuierlich ineinander umformen lassen. Es ist, als würde man einen Teig kneten, ohne Löcher in diesen zu reißen. Daher sind ein rundes Brötchen und ein längliches Baguette topologisch gesehen gleich, während ein Donut einer anderen Kategorie angehört. Topologen ordnen jeder Klasse eine »Invariante« zu, welche die unveränderlichen Eigenschaften der Objekte widerspiegelt. Für zweidimensionale Oberflächen ist eine solche Invariante beispielsweise die Anzahl ihrer Löcher.

In der Quantenmechanik gibt es etwas Vergleichbares. Stellt man sich die möglichen Zustände eines Teilchens als Punkte in einem Raum vor, dann verändert das Magnetfeld diesen Raum. Es ist, als würde es ihn krümmen. Dadurch beeinflusst es in von Klitzings Experiment die Geschwindigkeit und die Ausbreitungsrichtung der Elektronen in der Halbleiterstruktur. Diese Analogie zu geometrischen Objekten machten sich Thouless und seine Kollegen zu Nutze.

Topologen klassifizieren nämlich nicht bloß Oberflächen, sondern auch abstrakte Objekte. Deshalb konnten die vier theoretischen Physiker den Wellenfunktionen im Quanten-Hall-System eine topologische Invariante namens Chern-Zahl zuordnen, die einer Lochzahl für geometrische Oberflächen ähnelt. Sie bewiesen, dass die Hall-Spannung in von Klitzings Experiment umgekehrt proportional zu dieser Invarianten ist, die genau wie eine Lochzahl nur ganzzahlige Werte annimmt (siehe Bild links).

Als der deutsche Forscher während seines Experiments die Stärke des Magnetfelds immer weiter erhöhte, beobachtete er ein ruckartiges Wachstum des Hall-Widerstands, also des Verhältnisses aus Hall-Spannung und senkrecht dazu angelegtem Strom. An bestimmten Schwellenwerten veränderte das äußere Feld das Verhalten der Elektronen so stark, dass die Chern-Zahl des Systems auf den nächsten ganzzahligen Wert hüpfte. So wie eine extreme Krümmung irgendwann ein Loch in eine geometrische Oberfläche reißt, kann auch ein sehr starkes Magnetfeld die topologische Invariante eines abstrakten Raums ändern.

Die Topologie erklärt außerdem die bemerkenswerte Stabilität des seltsamen Quanteneffekts. Ähnlich wie das Kneten einer Teigmasse zwar die geometrische Form eines Gebäcks ändert, aber keine Löcher erzeugt, können Verunreinigungen eines MOSFETs der Chern-Zahl nichts anhaben. Die Unvollkommenheit der Probe verformt die Wellenfunktionen, ohne dabei die gesamte Topologie zu ändern.

Dreht man die Schraube einer Archimedes-Pumpe, bewegt sich das Wasser entlang des Pfeils nach oben. So kann man es von einem tiefer liegenden Becken in ein höheres befördern.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

AUF EINEN BLICK
VIERDIMENSIONALER QUANTEN-HALL-EFFEKT

1 Anders als die meisten anderen Quantenphänomene taucht der Quanten-Hall-Effekt unabhängig von mikroskopischen Details in Festkörpern auf.

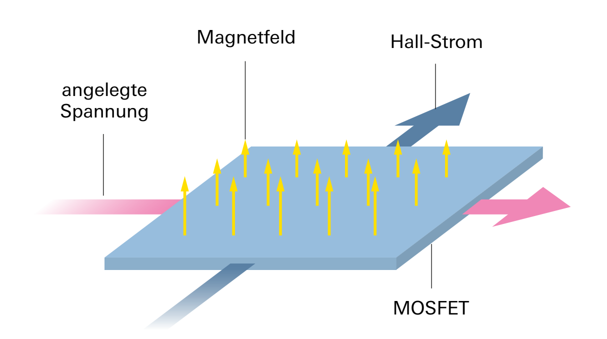
2 Lange galt er als Spezialfall: In ein- oder dreidimensionalen Materialien kann er nicht entstehen. Theoretischen Berechnungen zufolge könnte es den exotischen Effekt aber in vier Dimensionen geben.

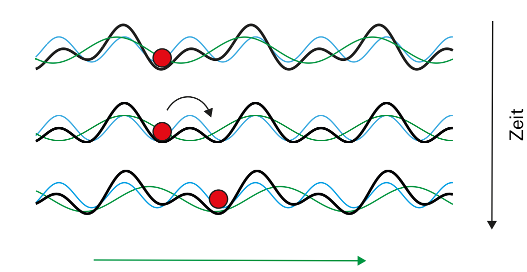
3 Zwei Forschergruppen haben nun unabhängig voneinander jeweils ein charakteristisches Merkmal des vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekts im Labor untersucht und dadurch seine Existenz bestätigt.

Eine neue Materialklasse ist geboren

Die Erkenntnisse von Thouless und seinen Kollegen sollten die Festkörperphysik revolutionieren. Doch bevor sich Wissenschaftler des Ausmaßes dieser Entdeckung bewusst wurden, vergingen etwa zwei Jahrzehnte. Anfangs hielt man den Quanten-Hall-Effekt für einen Spezialfall, der nur unter besonderen Bedingungen auftritt. Als unausweichliche Voraussetzung galt insbesondere die zweidimensionale Struktur der MOSFETs, die Elektronen in eine Ebene zwingt. Wenig später bewiesen Forscher auch mathematisch, dass es im Allgemeinen keinen Quanten-Hall-Effekt in drei Dimensionen geben kann.

Um das Jahr 2000 fanden zwei Teams aus theoretischen Physikern allerdings unabhängig voneinander heraus, dass eine ähnliche Form des Quanten-Hall-Effekts in vier Dimensionen auftreten könnte. Jürg Fröhlich und seine Kollegen von der ETH Zürich sowie die Gruppe von Shoucheng Zhang von der Stanford University berechneten, dass das bizarre quantenmechanische Phänomen nicht wie bisher angenommen bloß auf zweidimensionale Systeme beschränkt ist.





Legt man eine Spannung an ein MOSFET in einem starken Magnetfeld an (links), entsteht ein Hall-Strom, der wegen der Lorentzkraft senkrecht zur Spannung (pink) und zum Magnetfeld (gelb) verläuft. Tatsächlich entspricht das zweidimensionale Quantensystem einer eindimensionalen topologischen Ladungspumpe (rechts). Das optische Übergitter (schwarz), das sich aus der Überlagerung eines kurzen (blau) und langen (grün) Gitters ergibt, wird zeitlich verändert, wodurch Atome (rot) in benachbarte Senken tunneln können.

2-D-Quanten-Hall-Effekt	1-D-topologische-Ladungspumpe
angelegte Spannung	Verschieben des langen Gitters
Magnetfeld	Verhältnis von kurzer zu langer Gitterperiode
Hall-Strom	gepumpte Atome

In einer vierdimensionalen Probe sollte es den Wissenschaftlern zufolge nicht nur eine, sondern zwei quantisierte Hall-Spannungen geben. Im gewöhnlichen Quanten-Hall-Effekt erscheint diese Spannung senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen und zum äußeren Magnetfeld. Im vierdimensionalen Fall gibt es jedoch eine weitere Raumrichtung, die senkrecht zu den übrigen steht. Entlang dieser, das ergaben die Überlegungen der Physiker, würde unter bestimmten Umständen eine zweite quantisierte Spannung verlaufen.

Auf den ersten Blick erscheint der vierdimensionale Quanten-Hall-Effekt wie eine mathematische Kuriosität ohne wirkliche Relevanz. Allerdings hatte die Erkenntnis weit reichende Folgen. Durch sie begannen Wissenschaftler topologische Phänomene besser zu verstehen. Als 2007 die »topologischen Isolatoren« entdeckt wurden, begann ein regelrechter Boom, der neun Jahre später mit der Vergabe des Nobelpreises für Physik unter anderem an David Thouless seinen vorläufigen Höhepunkt fand und bis heute andauert.

Topologische Materialien sind ein junges Forschungsfeld, das noch viele Geheimnisse birgt. Elektronen verhalten sich in einigen dieser Festkörpern so seltsam, dass sie keinen bisher bekannten Teilchen ähneln. In manchen Systemen wirken die beweglichen Ladungen beispielsweise wie Bruchstücke eines Elektrons. Diese Zustände gelten als Hoffnungsträger für eine neue Art von Quantencomputer, der stabiler sein könnte als die aktuellen Varianten.

Abgesehen von der rasanten Entwicklung im Bereich der Festkörperphysik faszinierte der vierdimensionale Quanten-Hall-Effekt weiterhin die Wissenschaftler. Sie fragten sich, ob es wirklich zwei quantisierte Spannungen geben könnte. Das wäre ein vollkommen neues topologisches Phänomen, das noch niemand nachgewiesen hat. Wie sollte man auch einen vierdimensionalen Effekt in einer dreidimensionalen Welt untersuchen?

Tatsächlich ist es unserer Arbeitsgruppe an der Universität München zeitgleich mit einem Team um Mikael Rechtsman von der Pennsylvania State University 2018 gelungen, das vierdimensionale Phänomen im Labor zu studieren. In Zusammenarbeit mit den theoretischen Physikern Hannah Price und Oded Zilberberg haben meine Kollegen und ich mit Hilfe von ultrakalten Atomen zwei quantisierte Hall-Ströme gemessen, während sich Rechtsman und seine Gruppe auf ein anderes charakteristisches Merkmal topologischer Systeme konzentrierten: Sie wiesen mit Photonen nach, dass die Oberfläche eines vierdimensionalen Quanten-Hall-Systems leitend ist, während sein Inneres isoliert (siehe »Herumhüpfende Photonen«, S. 60).

Die entscheidende Idee für unseren Versuch hatte Zilberberg zusammen mit zwei Kollegen im Jahr 2013. Dabei griffen sie ein 30 Jahre altes Modell von David Thouless auf, die »topologische Ladungspumpe«. Der britische Physiker hatte damals gezeigt, dass die periodische Veränderung eines Systems zu einem Teilchenfluss führen kann, der eng mit dem Quanten-Hall-Effekt zusammenhängt. Im Prinzip beschrieb er die quantenmechanische Version einer Archimedes-Pumpe, die über eine Schraube in einem Rohr Wasser transportiert (siehe Bild, S. 57). Dreht man die Schraube – was einer periodischen Veränderung entspricht –, wird Wasser aus einem tiefer liegenden Becken in ein höheres gepumpt.

Das Besondere an dieser Pumpe ist, dass kein Potenzialunterschied durch eine elektrische Spannung oder die Schwerkraft nötig ist, um die Teilchen oder das Wasser zu bewegen. Stattdessen führt die zyklische Veränderung zu

dem Fluss. Obwohl das System nach einer Umdrehung genau so aussieht wie am Anfang, haben sich Wassermoleküle während des Vorgangs verschoben.

Die quantenmechanische Version der Archimedes-Pumpe von Thouless besteht aus einer eindimensionalen Kette geladener Teilchen, die periodisch verändert wird, wodurch sich die Position der Partikel ändert. Überraschenderweise hängt die topologische Ladungspumpe mit dem Quanten-Hall-Effekt zusammen: Thouless bewies, dass die Anzahl der pro Pumpzyklus transportierten Ladungen der Chern-Zahl entspricht, von der der Hall-Strom im Quanten-Hall-System abhängt. Diese Erkenntnis war für uns ein Grund zum Jubeln. Denn das bedeutet, dass es möglich ist, das zweidimensionale Quantenphänomen durch eine eindimensionale Teilchenkette zu untersuchen.

Diesem Gedanken folgend schlugen Zilberberg und seine Kollegen vor, dass man den vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt durch eine zweidimensionale topologische Ladungspumpe studieren könnte. Doch bevor wir uns dieser Aufgabe widmeten, setzten wir zuerst das ursprüngliche Modell von Thouless um.

Eine Wolke ultrakalter Teilchen, gefangen in einer optischen Falle

Dazu verwendeten wir ultrakalte Atome, die uns als »Quantensimulatoren« dienten (siehe **Spektrum** September 2016, S. 30). Solche quantenmechanische Systeme simulieren andere Quantensysteme. Gerade in der Festkörperphysik erweisen sich ultrakalte Atome als hilfreich: Während gewöhnliche Materialien aus über 10^{23} Teilchen bestehen, die auf vielfältige Weise miteinander wechselwirken, können Forscher ultrakalte Atome gut kontrollieren und zum Teil sogar die Wechselwirkungen zwischen ihnen steuern. So können sie einfache Modellsysteme realisieren, die in realen Festkörpern undenkbar sind.

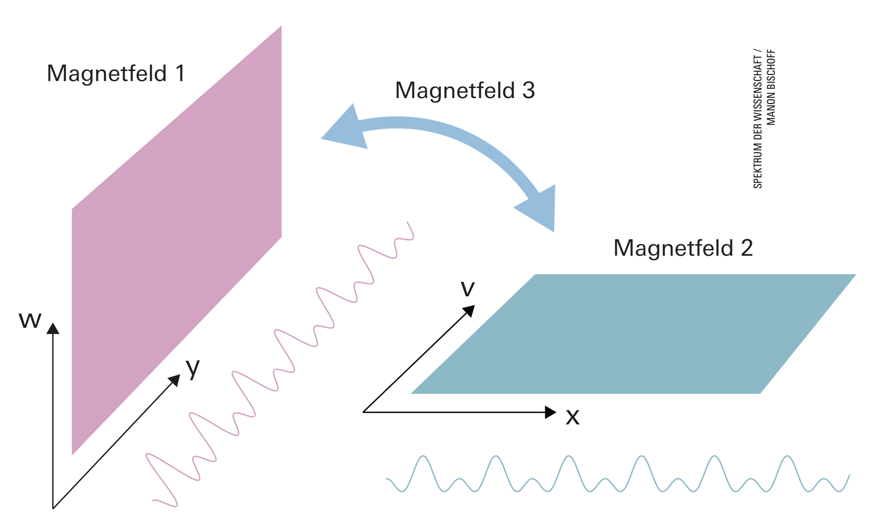
Zunächst mussten wir die Atome bis knapp über den absoluten Temperatur-Nullpunkt abkühlen. Doch wie erreicht man solch niedrige Temperaturen, die deutlich unterhalb der bekannter Kühlmittel wie etwa flüssigem Helium liegen – zumal sich die Atomwolke in unseren Experimenten in einer von außen unzugänglichen Vakuumkammer befindet? Die Lösung liefert die Laserkühlung (siehe **Spektrum** Juni 2003, S. 28), bei der man Teilchen durch Licht bremst. Dazu beschießt man sie von verschiedenen Seiten mit unzähligen Photonen, die zwar keine Masse haben, aber dennoch einen Impuls tragen. Durch ständige Stöße mit ihnen, absorbieren die Atome die Lichtteilchen und werden immer langsamer. Das ist, als würde man einen Lastwagen mit Tischtennisbällen bewerfen, um ihn abzubremsen. Glücklicherweise lassen sich Photonen deutlich einfacher erzeugen als Tischtennisbälle. Auf diese Weise konnten wir die Atome auf wenige milliardstel Kelvin abkühlen.

Jetzt mussten wir die so entstandene ultrakalte Teilchenwolke in einer Kette anordnen, um das Modell von Thouless umzusetzen. Dazu brauchten wir weitere Laser, die die Atome wie in einem Eierkarton fangen. Trifft ein Lichtstrahl auf ein Atom, vibrieren dessen Valenzelektronen mit der Frequenz des elektromagnetischen Lichtfelds, wodurch sich ein Dipol bildet. Bei geeigneter Laserfrequenz schwingen die Elektronen derart, dass sie stets mit dem Licht in Phase sind. In diesem Fall entsteht eine Kraft zwischen dem Dipol des Atoms und dem elektromagnetischen Feld des Lasers, wodurch sich das Teilchen zu der Stelle bewegt, an der der Strahl seine höchste Intensität hat.

In unserem Experiment stellten wir einen Spiegel auf, der den Laserstrahl auf sich selbst zurückreflektiert. Dadurch bildet sich eine stehende Welle aus, in der sich helle und dunkle Bereiche regelmäßig abwechseln. Die Atome aus der chaotischen Wolke ordnen sich dann in diesem eindimensionalen »optischen Gitter« an. Um die Analogie des Eierkartons wieder aufzugreifen, kann man sich das periodische Lichtmuster als sinusförmige Welle vorstellen, bei der die Intensitätsmaxima den Senken entsprechen, in denen die Atome gefangen sind.

Nun hatten wir eine geordnete Atomkette erzeugt. Wir benötigten also nur noch eine periodische Veränderung im Lichtmuster, ähnlich dem Drehen der Schraube in der Archimedes-Pumpe. Dafür brauchten wir ein komplizierteres optisches Gitter. Daher fügten wir eine weitere stehende Welle mit der halben Wellenlänge des ersten Lichtstrahls hinzu. Weil sich beide Laser überlagern, entsteht ein optisches »Übergitter«, in dem sich jedes Minimum des ursprünglichen Gitters in zwei benachbarte Senken spaltet, so genannte Doppeltöpfe (siehe Bild links).

Für die zyklische Veränderung verschoben wir die erste (»lange«) stehende Welle um genau eine Periode im Raum. Um das zu erreichen, variierten wir die Wellenlänge des Lasers minimal – um etwa ein hunderttausendstel ihres Werts. Die Periode des langen Gitters ändert sich dadurch kaum, so dass das Doppeltopfmuster des Übergitters beste-



Das Übergitter in x-Richtung (blau) entspricht einem Quanten-Hall-System mit einem starken Magnetfeld in der xv-Ebene, während das zweite Übergitter (rot) ein Quanten-Hall-System mit starkem Magnetfeld in der yw-Ebene simuliert. Ein schwaches zusätzliches Magnetfeld in der xw-Ebene koppelt die beiden Systeme.

Herumhüpfende Photonen

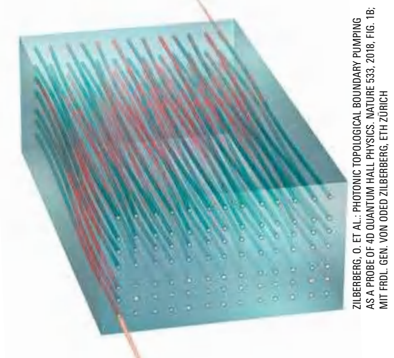
Topologische Materialien zeichnen sich nicht bloß durch jene quantisierten Teilchenflüsse aus, die meine Kollegen und ich untersucht haben. Eine ihrer bezeichnendsten Eigenschaften sind ihre extrem gut leitenden Oberflächen in Kombination mit einem isolierenden Inneren. Auf genau diese Eigentümlichkeit hat sich Mikael Rechtsman von der Pennsylvania State University mit seinem Team konzentriert, um den vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt nachzuweisen.

Die Oberfläche und das Innere eines topologischen Systems unterscheiden sich durch ihre jeweilige Leitfähigkeit. Diese wird in der Festkörperphysik durch das »Bändermodell« erklärt. In Festkörpern, die aus unzähligen Atomen bestehen, überlappen sich die einzelnen Atomorbitale, so dass breite Energiebänder entstehen. In diesen können Elektronen ein kontinuierliches Energiespektrum annehmen. Zwischen den Bändern klaffen aber Lücken, deren Werte die Energien der Teilchen nicht haben dürfen. In Isolatoren müssen Elektronen erst eine große Energielücke überwinden, bevor sie Strom leiten. Bei Metallen fehlt diese dagegen, so dass die Teilchen frei fließen können.

Ordnet man die Atome eines gewöhnlichen Isolators so um, dass während des Vorgangs die Energielücke geöffnet bleibt, ist das Material am Ende des Prozesses noch immer ein Isolator. Auf diese Weise kann man aber niemals einen »topologischen Isolator« erhalten. Während der Umformung des einen Isolatortyps in den anderen schließt sich zwangsläufig zumindest kurzzeitig die Energielücke.

So ist es auch, wenn man den räumlichen Übergang zwischen beiden Materialklassen betrachtet: An der Grenzfläche zwischen einem gewöhnlichen Isolator und seinem topologischen Äquivalent gibt es immer einen leitenden Bereich. Weil Vakuum und Luft gewöhnliche Isolatoren sind, ist die Oberfläche topologischer Materialien leitend. Dieses charakteristische Merkmal sollte genauso im vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt auftreten.

Rechtsman und seine Kollegen fanden heraus, dass sich die besondere Leitfähigkeit auch in der topologischen Ladungspumpe niederschlägt. Der Rand eines wie in unserem Versuch erzeugten Übergitters sollte daher leitend sein. Speist man also den Rand eines zweidimensionalen Gitters mit zusätzlichen Teilchen, müssten diese an den äußeren Grenzen des Gitters entlangspringen, ohne ins Innere einzudringen.



ZILBERBERG, O. ET AL.: PHOTONIC TOPOLOGICAL BOUNDARY PUMPING AS A PROBE OF 4D QUANTUM HALL PHYSICS. NATURE 533, 2018, FIG. 1B; MIT FRDL. GEN. VON ODED ZILBERBERG, ETH ZÜRICH

Die Forscher frästen dünne, gebogene Lichtleiter in einen Glasblock. Als sie Photonen in einen am Rand befindlichen Wellenleiter (unten links) einstrahlten, breiteten diese sich bloß entlang des Rands aus (rot) und tauchten nach einem Pumpzyklus, welcher der Tiefe des Glasblocks entspricht, am entgegengesetzten Ende (oben rechts) wieder auf.

Um das zu untersuchen, haben Rechtsman und sein Team ihre Ladungspumpen aus Lichtleitern gebaut und Photonen als Quantensimulatoren genutzt. Bei den Lichtleitern handelt es sich um hauchdünne Schläuche, ähnlich Glasfaserkabeln, die in einen Glasblock gefräst sind. Photonen können ihnen bloß entfliehen, wenn zwei Lichtleiter eng beisammen stehen.

Variiert man in regelmäßigen Zeitabständen die Distanz zwischen den senkrecht in einem Gitter angeordneten Leitern, entspricht das einer periodischen Veränderung des Systems. Allerdings gestaltet sich dieses Unterfangen sehr aufwändig. Daher nutzten Rechtsman und seine Kollegen einen Trick: Anstatt die Abstände zeitlich zu variieren, haben sie die Länge der Lichtleiter, in denen sich die Photonen ausbreiten, als Zeitrichtung identifiziert. Dadurch mussten die Forscher die Leiter bloß verformen, um so einen Pumpzyklus darzustellen.

Ordnet man gerade Lichtleiter in einem quadratischen Muster an, entspricht dieser Aufbau einem gewöhnlichen Metall. Wenn man nun Photonen in einen am Rand befindlichen Leiter strahlt, dringen immer mehr Lichtteilchen in benachbarte Leiter ein, bis sie sich schließlich gleichmäßig über das gesamte Gitter verteilen.

Um ihre Idee zu überprüfen, führten die Forscher ein solches Experiment zuerst mit geraden Lichtleitern durch, die sie aber in Form eines Übergitters anordneten, das heißt die Lichtleiter waren nicht mehr quadratisch in den Glasblock gefräst. Tatsächlich bewegten sich die Photonen bloß entlang eines Rands fort, ohne ins Innere der zweidimensionalen Anordnung einzudringen.

Als die Wissenschaftler den Versuch dann mit gebogenen Lichtleitern wiederholten, tauchten die ursprünglich an einem Rand eingestrahlten Photonen nach einem Pumpzyklus plötzlich auf der anderen Seite des Systems auf. Damit haben die Forscher um Rechtsman eine weitere Bestätigung des vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekts geliefert.

hen bleibt. Über die vergleichsweise große Distanz, die der Laserstrahl in unserem Aufbau zurücklegt, verschiebt sich jedoch seine Lage der Minima und Maxima. Für die Atome ist es, als würde sich das lange Gitter geradlinig bewegen.

Während eines »Pumpzyklus«, in dem das lange Gitter genau eine Periode zurücklegt, würde sich ein klassisches Teilchen innerhalb einer Senke nicht vom Fleck rühren. Denn obwohl sich die Tiefe der Gitterminima periodisch ändert, bleiben sie stets an der gleichen Stelle.

Wegen des quantenmechanischen Tunneleffekts können die Atome zu tieferen, benachbarten Minima hüpfen und so der Bewegung des langen Gitters folgen. Diesen eindrucksvollen Vorgang haben wir 2015 in unserem Labor beobachtet. Da der Teilchenfluss in unserem Experiment der Chern-Zahl und damit dem Hall-Strom eines zweidimensionalen Systems entspricht, hatten wir das eindimensionale Äquivalent des Quanten-Hall-Effekts geschaffen.

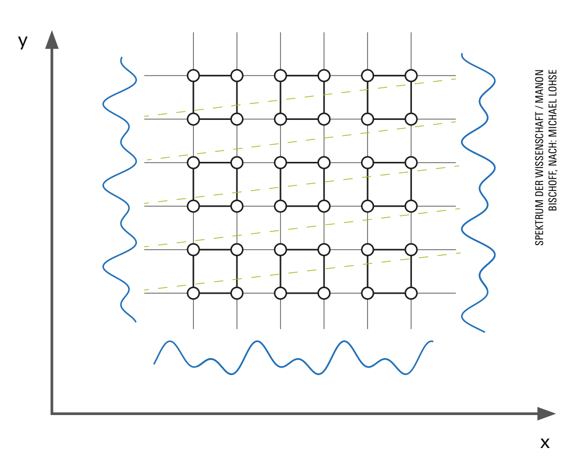
Um unser Experiment auf den höherdimensionalen Fall zu verallgemeinern, mussten wir zuerst verstehen, wie die eindimensionale Ladungspumpe mit dem Quanten-Hall-Effekt zusammenhängt. In von Klitzings Versuch flossen die Elektronen entlang einer angelegten Spannung (x-Richtung); sie wurden jedoch durch die Lorentzkraft abgelenkt (y-Richtung) und erzeugten dort einen quantisierten Hall-Strom. Nun wollten wir die Größen in der Ladungspumpe identifizieren, die der angelegten Spannung, dem Magnetfeld und dem Hall-Strom entsprechen (siehe Tabelle, S. 58).

Die Verschiebung des langen Gitters setzt den Pumpzyklus erst in Gang, sie entspricht daher einer angelegten Spannung im Quanten-Hall-System. Der Hall-Strom hängt von der Chern-Zahl ab, die wiederum der Anzahl der gepumpten Atome im optischen Gitter entspricht. Doch was ist das Äquivalent des Magnetfelds? Im Quanten-Hall-Effekt beeinflusst die Stärke des Magnetfelds die Chern-Zahl und damit den Hall-Strom. In der Ladungspumpe hängt die Anzahl der getunnelten Atome von der Form des Übergitters ab. Je nachdem, wie sich das optische Gitter über einen Pumpzyklus verändert, können die Teilchen über mehrere Senken hinweg tunneln. Die Form des Übergitters ergibt sich aus den Perioden des kurzen und des langen Gitters. Das Verhältnis beider Gitterperioden (das in unserem Experiment 0,5 ist, da die Wellenlänge des ersten Lasers doppelt so groß ist wie die des anderen) steuert die Anzahl der gepumpten Atome. Daher entspricht dieses Verhältnis der Stärke des simulierten Magnetfelds.

Von der eindimensionalen Ladungspumpe in die zweite Dimension

Um das Quantenphänomen in vier Dimensionen zu untersuchen, überlegten sich Zilberberg und seine Kollegen, dass drei Zutaten nötig sind: Eine zweidimensionale Ladungspumpe sowie das Äquivalent eines elektrischen und eines magnetischen Felds im vierdimensionalen Modell.

Die ersten beiden Zutaten hatten wir schnell identifiziert. Zuerst ordneten wir zwei topologische Ladungspumpen senkrecht zueinander so an, dass sich ihre Minima kreuzen. Dadurch entstand ein zweidimensionales Übergitter in der xy-Ebene (siehe Bild rechts). Das Äquivalent eines elektrischen Felds, also einer Spannung, ist in diesem Modell



Verkippt man das lange Gitter der eindimensionalen Ladungspumpe in y-Richtung um einen kleinen Winkel, koppelt man die durch die Übergitter (blau) erzeugten, senkrecht aufeinanderstehenden Ladungspumpen und simuliert damit ein schwaches Magnetfeld im vierdimensionalen Quanten-Hall-System.

denkbar einfach: Es entspricht der Bewegung des langen Gitters in x-Richtung, genau wie im eindimensionalen Fall.

Das Magnetfeld gestaltete sich aber komplizierter. Anders als in drei Dimensionen haben Magnetfelder in vier Dimensionen nämlich keine Richtung; stattdessen sind ihre Werte in zweidimensionalen Ebenen definiert. In vier Dimensionen mit den Koordinaten x,y,v und w (wobei v und w die virtuellen Dimensionen unseres Experiments sind) kann ein Magnetfeld in mehreren der dadurch definierten Ebenen verlaufen.

Die senkrecht angeordneten Ladungspumpen simulieren durch die jeweiligen Verhältnisse ihrer kurzen und langen Gitterperioden (in diesem Fall ist die eine doppelt so lang wie die jeweils andere) die Magnetfelder zweier separater Quanten-Hall-Systeme: Eines in der xv- und eines in der yw-Ebene (siehe Bild, S. 59). Verschiebt man das lange Gitter in x-Richtung, beobachtet man bloß den zweidimensionalen Quanten-Hall-Effekt im xv-System – also nichts Neues. Um ein vierdimensionales Phänomen aufzuspüren, brauchten wir ein schwaches zusätzliches Magnetfeld in xw-Richtung, das die Bewegung der Teilchen in den xv- und yw-Ebenen koppelt. Nur so kann ein zweiter quantisierter Strom im vierdimensionalen System entstehen.

Also standen wir vor der Aufgabe, mit unserem Lasersystem ein drittes Magnetfeld zu simulieren, das die senkrecht angeordneten Ladungspumpen miteinander koppelt. Unsere Idee war es, den Laserstrahl des langen Gitters der y-Richtung um einen kleinen Winkel zu verkippen, so dass die langen Gitter in der xy-Ebene nicht mehr senkrecht aufeinander treffen und sich die Ladungspumpen dadurch gegenseitig beeinflussen. Die Form der Doppeltöpfe in y-Richtung hängt dann von der x-Koordinate ab. Die physikalischen Auswirkungen kommen einem schwachen Magnetfeld in der xw-Ebene des vierdimensionalen Quanten-Hall-Systems gleich.

Als wir alle nötigen Zutaten für unseren Versuch identifiziert hatten, konnten wir mit dem Experiment beginnen. Wir verwendeten einen ähnlichen Aufbau wie für den

eindimensionalen Fall, um die senkrecht zueinander stehenden Ladungspumpen zu realisieren. Anschließend verkippten wir das lange Gitter in y-Richtung um einen kleinen Winkel, so dass es unter einem anderen Winkel auf die Atomwolke trifft als das kurze.

Dazu führten wir den betreffenden Laserstrahl durch einen 25 Millimeter dicken Glasblock und fokussierten ihn mit einer Linse auf die Atomwolke. Dreht man den Block leicht, wird das Licht an beiden Grenzflächen gebrochen. Dadurch tritt es etwas parallel versetzt aus dem Block aus und trifft nicht mehr zentral auf die Linse. Die Photonen durchqueren zwar nach wie vor die Atomwolke, allerdings unter einem anderen Winkel als zuvor.

Als wir anschließend das lange Gitter in x-Richtung verschoben, um den Pumpzyklus in Gang zu setzen, tunnelten die Atome wie bei der eindimensionalen Ladungspumpe in benachbarte Senken in x-Richtung. Um den vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt nachzuweisen, mussten sich aber auch Teilchen in y-Richtung bewegen, was einem zweiten quantisierten Hall-Strom gleichkäme. Zunächst schien nichts zu passieren. Nach mehreren Pumpzyklen konnten wir jedoch eine winzige Ablenkung der Atome beobachten – der erste Hinweis auf die Existenz eines vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekts. Die Ablenkung war allerdings so klein, dass wir sie nicht direkt quantifizieren konnten. Wir mussten also einen anderen Weg finden, um sie exakt zu messen. Deshalb bedienten wir uns eines Tricks.

Vermessen eines kaum wahrnehmbaren Teilchenstroms

Das optische Gitter besteht in beiden Richtungen aus eindimensionalen Doppeltöpfen. Daher sind in der »Einheitszelle« (der Grundbaustein, aus dem sich das gesamte Gitter zusammensetzt) vier quadratisch angeordnete Minima. Wir haben unser Experiment so justiert, dass sich in jeder Einheitszelle nur ein Atom befindet. Seine Wellenfunktion bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit wir es bei einer Messung in der jeweiligen Senke finden.

Durch die Ablenkung der Atome in y-Richtung ändert sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Doch auch dieser Effekt ist so klein, dass wir ihn nicht direkt beobachten konnten. Was tun Wissenschaftler, wenn die Größe, die sie beobachten möchten, zu klein ist? Sie sammeln mehr Daten, um eine bessere Statistik zu erhalten. Deshalb bestimmten wir nicht die Änderung der Wellenfunktion eines einzigen Atoms, sondern mittelten über alle Teilchen und mehrere Versuche.

Dazu schalteten wir alle Laser in unserem Aufbau gezielt aus, wodurch sich die Atome frei im Raum ausbreiteten. Aus der speziellen Ausschaltprozedur konnten wir mittels der Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung der Teilchen berechnen, in welcher Senke sie sich zuvor befanden. Und tatsächlich konnten wir aus den Ergebnissen ablesen, dass sich die ultrakalten Atome während der Pumpzyklen entlang der y-Richtung verschoben hatten. Zudem ergaben unsere Messungen, dass diese Bewegung quantisiert ist, genau wie es für den vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt vorhergesagt wurde.

Um auszuschließen, dass es sich dabei um eine zufällige Beobachtung handelte, haben wir den Kippwinkel des langen Gitters – also die Stärke des Magnetfelds in der xw-Ebene – verändert. Theoretischen Berechnungen zufolge ist der Teilchenfluss in y-Richtung proportional zum Kippwinkel. Und genau diesen linearen Zusammenhang sahen wir in unseren Experimenten. Insbesondere bewegten sich die Atome in umgekehrter Richtung, wenn wir das Vorzeichen des Winkels wechselten.

Damit haben wir den vierdimensionalen Quanten-Hall-Effekt in einem dreidimensionalen Labor nachgewiesen. Unsere Arbeit liefert zusammen mit den Ergebnissen von Rechtsman und seinen Kollegen einen ersten Einblick in die faszinierende Welt der hochdimensionalen topologischen Physik.

Sowohl aus theoretischer als auch aus experimenteller Sicht bergen diese Zustände noch viele Geheimnisse. Eines der spannendsten unter ihnen ist die Frage, wie sich ein vierdimensionales Quanten-Hall-System verändert, wenn Elektronen miteinander wechselwirken. In unseren Experimenten verhielten sich die Atome wie Elektronen, die sich weder anziehen noch abstoßen.

In echten Festkörpern ist das in der Regel anders. In diesen Fällen nimmt die quantisierte Spannung nicht nur ganzzahlige, sondern auch gebrochenzahlige Werte an. Dieses Phänomen ist seit seiner Entdeckung vor mehr als 30 Jahren als fraktionaler Quanten-Hall-Effekt bekannt (siehe **Spektrum** Juni 1999, S. 74), denn die Teilchen in solchen Systemen verhalten sich wie ein Bruchteil eines Elektrons. Physiker hoffen ihre eigentümlichen Eigenschaften bei der künftigen Entwicklung neuartiger Quantencomputer nutzen zu können.

Ähnlich exotische Phänomene wurden genauso für vierdimensionale wechselwirkende Quanten-Hall-Systeme vorhergesagt. Wie man diese experimentell beobachten könnte, wissen wir aber noch nicht. Unsere Methoden lassen sich nicht ohne Weiteres auf wechselwirkende Systeme übertragen; dafür bräuchten wir einen völlig neuen Ansatz.

Neben offenen Fragen der Grundlagenphysik könnten unsere Experimente außerdem für technische Anwendungen interessant sein. Besonders vielversprechend erscheint die Möglichkeit, einen neuen Standard für die SI-Einheit Ampère durch topologische Ladungspumpen zu definieren. Eine solche Ladungspumpe für Elektronen würde einen quantisierten und äußerst stabilen Stromfluss erzeugen, der direkt von der Elementarladung abhängt. Damit könnte die topologische Ladungspumpe in die Fußstapfen ihres großen Bruders, des Quanten-Hall-Effekts, treten, der bereits zur Definition des elektrischen Widerstands dient. ◂

QUELLEN

Lohse, M. et al.: Exploring 4D quantum Hall physics with a 2D topological charge pump. Nature 553, 2018

Thouless, D. J.: Quantization of particle transport. Physical Review B 27, 1983

Zilberberg, O. et al.: Photonic topological boundary pumping as a probe of 4D quantum Hall physics. Nature 553, 2018

1919



Felsbehausungen von Mesa Verde.

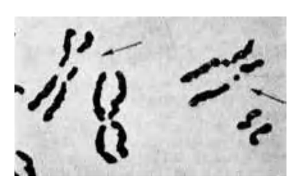
PER AUTOBAHN IN DIE STEINZEIT

»Der Nationalpark Mesa Verde in der gebirgigen Südostecke des Staates Colorado bietet besonders geschichtliches Interesse, da er die Überreste einer heute verschwundenen Kultur umschließt, von der man sich noch nicht ganz klar darüber zu sein scheint, ob sie ein paar hundert oder vielleicht auch 2000 Jahre zurückliegt. Leider ist der Schutz der Regierung reichlich spät gekommen, und so konnte es denn nicht ausbleiben, daß aus Unkenntnis und Habsucht vieles zerstört und fortgeschleppt wurde. An der Erschließung der noch verbliebenen Schätze arbeitet besonders die Smithonian Institution, die manches noch ausgräbt und durchsucht. Man vermutet, daß die früheren Bewohner die Stammväter der jetzt noch in der Nähe lebenden Pueblo und Moqui-Indianerstämme waren, und sucht nun die verschiedenen Funde zu deuten. Unter diesen sind besonders gut erhaltene Mumien bemerkenswert, ferner Maiskolben und Maiskörner, die noch keimfähig sich erwiesen haben. Durch eine direkt nach dem Nationalpark führende neue Kraftwagenstraße sind die Ruinen so zugänglich gemacht, daß man ›direkt aus dem Automobil ins Steinzeitalter hineinsteigen kann‹.« *Prometheus 1542, S. 263–264*

BLINDGÄNGER AUF DER SPUR

»Die zahlreichen in Frankreich auf den Schlachtfeldern liegenden und nicht explodierten Geschosse werden durch eine von Prof. Gutton aus Nancy zum erstenmal in Anwendung gebrachte wissenschaftliche Methode unschädlich gemacht. Gutton ging von der Induktionswage von Hughes aus. Wenn man dem Apparat ein Stück Metall nähert, wird das Gleichgewicht des elektromagnetischen Feldes unterbrochen und im Telephon ist ein charakteristisches Geräusch zu hören. Dieses Instrument diente im Kriege zur Ermittlung der Geschoßsplitter im menschlichen Körper. Die Form, die Prof. Gutton dieser Wage gab, ermöglicht nun ihre Verwendung zur Entdeckung vergrabener Geschosse. Damit das Telephon den erwünschten Zweck erfülle, wurde es derart konstruiert, daß es nur auf Metalle bestimmter Größe und die nicht zu tief im Erdboden sich befinden, reagiert.«
Die Umschau 19, S. 299

1969



Chromosomenbrüche nach Chloramphenicolbehandlung.

GENSCHÄDIGENDES BREITBAND-ANTIBIOTIKUM

»In hohen Dosen kann Chloramphenicol Brüche an Chromosomen von Zellkernen des Knochenmarks hervorrufen. Im Mai 1968 hat die Food and Drug Administration eine Warnung an alle Ärzte der USA gesandt, da das Auftreten schwerer bis tödlicher ›Blutdyskrasien‹ unter Anwendung von Chloramphenicol zugenommen habe. Tödliche Knochenmarkschäden [sind] im Bundesgebiet sehr viel seltener beobachtet worden als in den USA. Die Entstehung einer Schädigung wird heute zumeist auf eine individuelle Überempfindlichkeit zurückgeführt. Chloramphenicol ist ein kaum entbehrliches Antibiotikum. Damit es weiterhin voll zur Verfügung steht, sollten strenge Indikationsstellung sowie Beschränkung der Dosierung und Anwendungsdauer beachtet werden.«
Naturwissenschaftliche Rundschau 5, S. 214–215

[Anm. der Red.: Wegen seiner möglichen schweren Nebenwirkungen wird Chloramphenicol in Deutschland heute nur noch als Reserveantibiotikum eingesetzt, in Entwicklungsländern hingegen wegen seiner geringen Kosten aber noch weitaus häufiger.]

AUS SCHROTT WIRD GOLD

»Bereits heute geht ein erheblicher Anteil des Verbrauchs an Gold, Silber, Palladium und Platin in die elektronische Industrie. Ähnlich wie die Erze zunächst aufbereitet und verhüttet, die Edelmetalle schließlich geschieden werden müssen, ist es mit den Abfällen. Ein Unterschied besteht allerdings, da grundlegend neue Rückgewinnungsverfahren entwickelt werden müssen. Der Metallhüttenmann sieht sich vor der Aufgabe, die Aufbereitungskosten im Verhältnis zum Metallwert gering zu halten. In diesem Zusammenhang darf nicht unerwähnt bleiben, daß mitunter wertvolle Nichtedelmetalle mitanfallen, z. B. Molybdän und Wolfram.« *Elektronik 5, S. 155*

SCHÖPFUNGSFUNKEN AUS DEM ALL

»Atmosphärenbestandteile und Wasser sind beim Aufschlag von Asteroiden entgast. Ebenso kann man annehmen, daß kohlenstoffhaltiges Material sowie Stickstoff vorhanden waren. Unstabile Verbindungen, wie Ammoniak und Kohlenmonoxid können nach heutiger Kenntnis in der natürlichen Umgebung nicht entstehen. Vielmehr dürfte die Aktivierung verschiedenster Moleküle durch ultraviolettes Licht in der hohen Atmosphäre für spätere Spontansynthesen verantwortlich sein; gleichwertig sind auch elektrische Entladungen. Etwa vor 2 Milliarden Jahren scheint auch freier Sauerstoff aufgetreten zu sein.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 5, S. 215*

SCHLICHTING!

DIE PHYSIK IM DIENST DER KUNST

zum 500. Todestag Leonardo da Vincis



Leonardo da Vinci war überzeugt, jegliche Praxis müsse auf guter Theorie beruhen. Seine eigenen Untersuchungen zu optischen Erscheinungen machten ihn zu einem Vorreiter der neuzeitlichen Physik.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

▸▸ spektrum.de/artikel/1634764

Er glich einem Menschen, der in der Finsternis zu früh erwacht war, während die anderen noch alle schliefen
Sigmund Freud (1856–1939)

Kleine Lücken im Blattwerk von Bäumen werfen zahlreiche Bilder der Sonnenscheibe auf den Boden.

H. JOACHIM SCHLICHTING

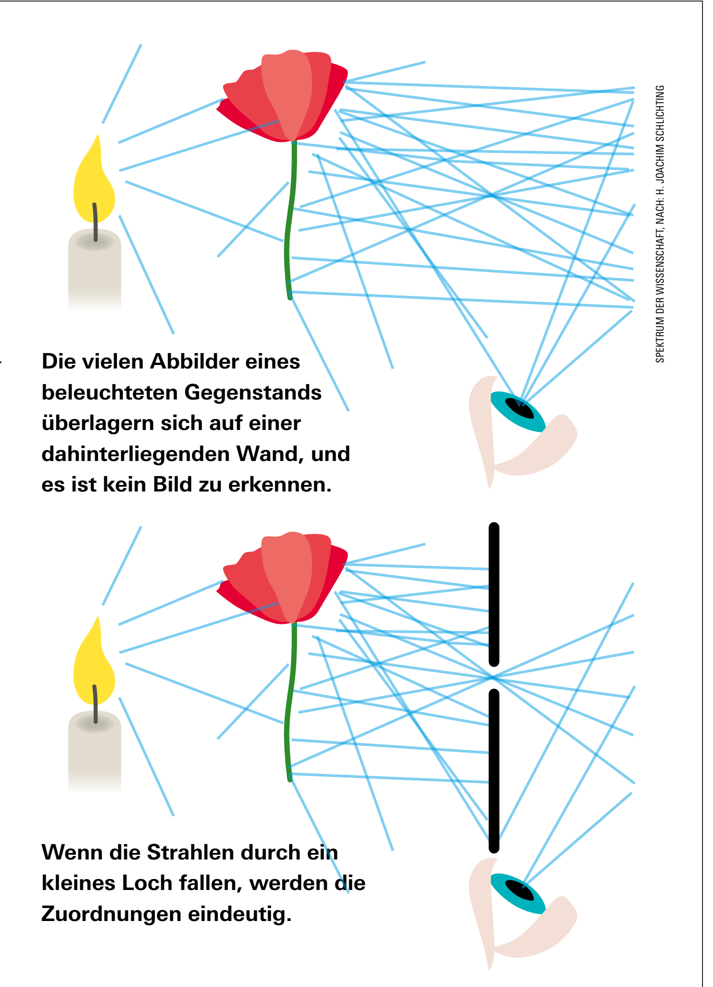
Leonardo da Vinci ist vor allem als Ausnahmekünstler in Erinnerung geblieben – einige seiner Gemälde gehören zu den berühmtesten der Welt. Weniger bekannt ist, dass er sich als Naturforscher optische Regeln für sein Schaffen erarbeitet hat. Die meisten davon sind noch heute gültig, 500 Jahre nach seinem Tod. Mit Hilfe seiner physikalischen Einsichten verlieh er beispielsweise der Mona Lisa über die bloße realistische Abbildung hinaus eine große Lebendigkeit, wie sie bis dahin in der Malerei nicht anzutreffen war.

So nutzte Leonardo auf einfühlsame Weise Lichteffekte auf dem Körper und dem Gewand. Er forderte, Schatten »sollen nie so beschaffen sein, dass durch ihre Dunkelheit die Farbe an dem Ort, wo sie entstehen, ganz verloren geht«. Man dürfe keine scharfen Umrisse machen und keine weißen Lichter setzen außer auf weiße Dinge. Darüber hinaus nutzte er einen Aspekt der Farbperspektive, der in dem typischen Blauschimmer ferner Objekte zum Ausdruck kommt: »Ein sichtbarer Gegenstand wird seine wirkliche Farbe in dem Maße weniger zeigen, in dem das zwischen ihn und das Auge eingeschobene Mittel an Dicke der Schicht zunimmt. Das Mittel zwischen dem Auge und dem gesehenen Gegenstand wandelt die Farbe dieses Gegenstandes zur seinigen um.« Er erkannte, dass Wechselwirkungen des weißen Sonnenlichts beim Durchgang durch eine größere Luftschicht eine Blautönung bewirken. Damit war er seiner Zeit weit voraus. Erst der britische Lord Rayleigh konnte Ende des 19. Jahrhunderts das Himmelsblau erklären. Doch bereits Leonardo hatte den richtigen Ansatz: Der Himmel wird deshalb hell und blau, weil »winzige und unsichtbare Atome es streuen«. Er täuschte sich nur darin, dass er Wasserteilchen in der Luft für die Ursache hielt und nicht die Luft selbst.

Jedem Pinselstrich gingen praktische und theoretische Erkenntnisse voraus

So physikalisch durchdacht und natürlich zugleich hat vor Leonardo wohl keiner gemalt. Er versuchte, auf Basis seiner experimentellen und theoretischen Erkenntnisse den statischen und eingefrorenen Charakter eines Gemäldes zu überwinden. Martin Kemp, ein britischer Kunsthistoriker und Experte für da Vincis Werk, betont, dessen Technik weise Ähnlichkeiten mit den Computersimulationen unserer Tage auf, die natürlich wirkende Landschaften generieren. Auch dabei spielt es eine zentrale Rolle, alle physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu erfassen, die zum visuellen Eindruck des Bilds führen. Kemp zufolge veranschaulichen Leonardos Studien von Licht, das von einer punktförmigen Quelle ausgehend die Konturen eines Gesichts trifft, »dass es ihm darum ging, mittels eines Systems, das dem der Strahlenaufzeichnung in der Computergrafik entspricht, modellierte Formen zu erzeugen«.

Grundlage der optischen Vorstellungen Leonardos ist das euklidische Modell, wonach sich Licht strahlenförmig, geradlinig und radial in alle Richtungen ausbreitet. Dabei entwickelt er die Erkenntnisse des griechischen Mathematikers weiter und geht davon aus, dass wir Gegenstände sehen, weil das von ihnen ausgesandte Licht in unsere Augen fällt. Für den Künstler sind alle Dinge Lichtquellen. Sie werden dazu, weil sie selbst im Licht anderer Quellen wie der Sonne, des Himmels oder einer Kerzenflamme stehen, deren Schein sie diffus oder spiegelnd reflektieren.



Die vielen Abbilder eines beleuchteten Gegenstands überlagern sich auf einer dahinterliegenden Wand, und es ist kein Bild zu erkennen.

Wenn die Strahlen durch ein kleines Loch fallen, werden die Zuordnungen eindeutig.

Ausgesprochenes Augenmerk richtet Leonardo auf die Schatten. Er sieht sie ganz allgemein als Unterdrückung von Licht. Zusammen mit diesem gestalten sie die dreidimensionale Erscheinung: »Der Schatten ist das Mittel, durch das die Körper ihre Form offenbaren.« Dabei macht er insbesondere auf die Abnahme der Flächenhelligkeit mit dem Einfallswinkel aufmerksam. Erst im 18. Jahrhundert beschrieb der Mathematiker Johann Heinrich Lambert die Entdeckung im »lambertschen Kosinusgesetz« quantitativ.

Leonardo zufolge tragen die von einem Gegenstand ausgehenden Lichtstrahlen die gesamte optische Information von dessen Oberfläche: »Jeder Körper füllt die umgebende Luft mit seinem Ebenbild, welches das Ebenbild im Ganzen und in allen Teilen ist. Die Luft ist voll unendlich vieler gerader und strahlenförmiger Linien, die


Aus einem Baum werden drei – durch seine Reflexion und seinen Schatten auf einem Fluss.

H. JOACHIM SCHLICHTING

einander überschneiden und miteinander verwoben sind und die jedwedem Ding die wahre Form ihres Ausgangspunktes darstellen.«

Diese konsequente Weiterentwicklung des euklidischen Strahlenmodells des Lichts erklärt zum Beispiel, warum an einer weißen Wand kein Abbild eines davorstehenden farbigen Gegenstands zu sehen ist. Denn das Licht eines jeden Punkts des Gegenstands gelangt zu jedem Punkt der Wand. Daraufhin überlagern und mischen sich die Farben und die Helligkeiten (siehe Illustration S. 65, oben). Nur wenn die Lichtstrahlen durch ein sehr kleines Loch fallen, ist die Zuordnung zwischen den Punkten des Gegenstands und der Wand eindeutig. Leonardo erkennt das und bewundert, wie »schon verlorene, in einem so kleinen Raum verschmolzene Formen bei seiner Erweiterung wieder hervorgebracht und neu gebildet werden können«. Mit »Erweiterung« meint der Künstler ein Loch in der Wand, durch welches das Licht in einen benachbarten Raum fällt. Er fragt sich zudem, warum »aus verschwommenen Ursachen so deutliche und klare Wirkungen hervorgehen«, und bemerkt, dass die Bilder dann immer auf dem Kopf stehen: »Es ist unmöglich, dass die Bilder, die durch Löcher in einen dunklen Raum dringen, nicht umgekehrt erscheinen.« Leonardo hat das Prinzip der Camera obscura als wesentliches Element der optischen Abbildung ausgemacht und in ausgeklügelten Modellexperimenten auf das menschliche Auge angewandt. So gelangte er zu einer im Wesentlichen korrekten Erklärung des Sehens.

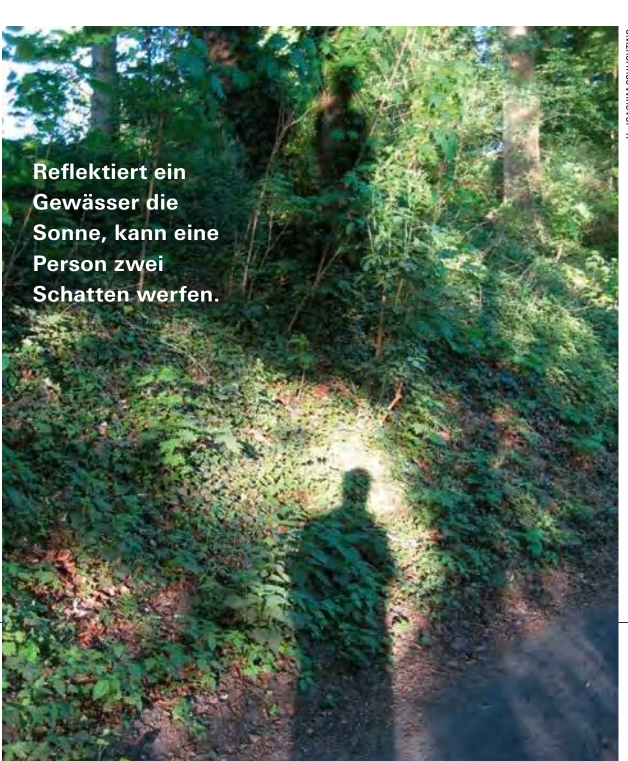
Synthese von Beobachtung und Theorie

In diesem Zusammenhang spricht Leonardo auch ein Naturphänomen an, das heute als Sonnentaler (siehe Foto S. 64) bezeichnet wird: »Geht der Lichtstrahl durch einen Spalt von besonderer Form, so wird nach langem Weg das durch seinen Anprall geschaffene Abbild dem leuchtenden Körper gleichen, von dem er kommt.« Das heißt, die »besondere Form« des Spalts hat bei der Abbildung keinen Einfluss, sofern der Abstand groß ist. Eine endgültige physikalische Erklärung gelingt erst ein Jahrhundert später Johannes Kepler mit der entscheidenden Idee, eine ausgedehnte Lichtquelle als Ensemble unendlich vieler Punktlichtquellen aufzufassen.

Als Forscher konnte Leonardo seine Malerei vervollkommnen. Umgekehrt kamen seine künstlerischen Fähigkeiten – insbesondere die der genauen Beobachtung – seinen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen zugute. Die von ihm gezeichneten Studien waren nicht bloß eine genaue Abbildung eines Gegenstands, sondern vielmehr eine Synthese von Beobachtungen und theoretischen Konstruktionen. Beispielsweise verband er in einer Zeichnung oft subtil unterschiedliche Perspektiven, um die wesentlichen Elemente hervorzuheben.

Auf diese spezielle Weise blickte Leonardo auch auf Alltagsphänomene. Ihm war etwa klar, dass trotz der häufig täuschenden Ähnlichkeit zwischen Original und Spiegelbild auf dem Wasser eine grundsätzliche Asymmetrie besteht. Er wusste: »Es ist unmöglich, dass das, was auf dem Wasser gespiegelt wird, die gleiche Gestalt hat wie der sich spiegelnde Gegenstand, da der Mittelpunkt des Auges über der Oberfläche des Wassers liegt.« Dieses Phänomen wird häufig übersehen, obwohl der Effekt oft sehr deutlich ist, wenn man erst einmal darauf achtet. Bei seinen Untersuchungen entdeckte er außerdem, dass »kein glänzender und durchsichtiger Körper auf sich den Schatten irgendeines Gegenstandes aufweisen kann«. Als Beispiel nannte er die Schatten von Brücken über Flüssen, welche man nicht sehen kann, wenn diese klar sind, sondern »nur, wenn das Wasser trüb ist«.

Vielleicht haben ihn diese Entdeckungen zur folgenden, fast wie ein Rätsel klingenden Aussage gebracht: »Man wird oftmals sehen, wie aus einem Menschen drei


Reflektiert ein Gewässer die Sonne, kann eine Person zwei Schatten werfen.

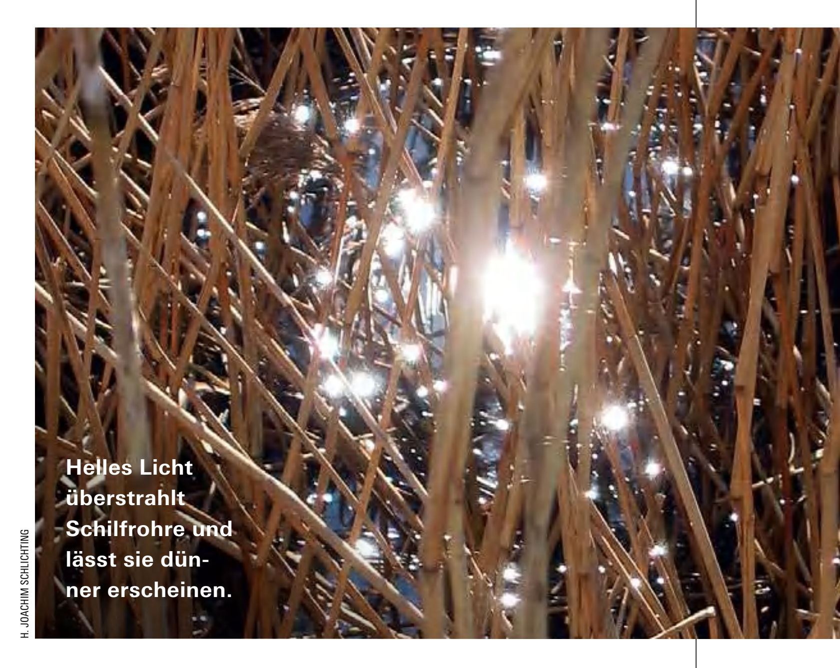
H. JOACHIM SCHLICHTING

werden und alle ihm folgen: und häufig verlässt sie gerade dieser eine, der ähnlichste.« Damit könnte das Phänomen gemeint sein, dass auf trübem Wasser oder durch sehr flaches hindurch nicht nur das Spiegelbild eines Menschen zu sehen ist, sondern auch sein Schatten. Beide fallen nämlich im Allgemeinen nicht zusammen (siehe Foto links oben für den Fall eines Baums). Leonardo nimmt noch das Original hinzu und kommt so auf drei. Alternativ käme der Doppelschatten eines Menschen auf einer Böschung in der Nähe eines Gewässers in Frage, der zum einen durch die Sonne direkt und zum anderen durch ihr Spiegelbild entsteht (siehe Foto links unten).

Sehr konkret und anschaulich spricht er hingegen das Phänomen von Lichtbahnen auf Wasseroberflächen an, Schwert der Sonne genannt (siehe » Lichtbahnen über den Wellen«, **Spektrum** Juni 2017, S. 58): »Wo immer die Sonne das Wasser sieht, da sieht das Wasser auch die Sonne und kann daher überall das Bild der Sonne dem Auge wiedergeben. Die unzähligen Bilder, die von den unzähligen Wellen des Meeres gespiegelt werden, weil die Sonnenstrahlen diese Wellen treffen, sind die Ursache des fortwährenden und grenzenlos weiten Glanzes über der Oberfläche des Meeres.« Er notiert zudem die damit zusammenhängende Beobachtung, dass im leicht gewellten Wasser gespiegelte Gegenstände »immer größer erscheinen als der Gegenstand außerhalb des Wassers, von dem sie herkommen«.

Ob irdische Kugel oder Himmelskörper, die Regeln der Optik gelten für alle

Ähnlich präzise und verständlich formuliert Leonardo, was es mit den Mondphasen auf sich hat: »Der Mond hat kein Licht von sich aus, und so viel die Sonne von ihm sieht, so viel beleuchtet sie.« Wir bekämen unterdessen immer nur so viel von dieser Beleuchtung mit, »wie viel davon uns sieht«. Zudem erklärt er das aschgraue Licht, das oft schemenhaft beim jungen Mond zu sehen ist und das ihn zu seiner vollen, runden Form ergänzt: »Seine Nacht empfängt so viel Helligkeit, wie unsere Gewässer ihm spenden, indem sie das Bild der Sonne widerspiegeln.« Allerdings sind dafür tatsächlich vor allem Wolken und andere Licht streuende Flächen der Erde verantwortlich. Dennoch hat er damit das Phänomen im Prinzip erfasst. Erstaunlicherweise behandelt er den Mond fast selbstverständlich wie einen in der Sonne liegenden irdischen Gegenstand. Diese Einsicht versuchte Galilei 100 Jahre später mit Hilfe des von ihm konstruierten Fernrohrs durchzusetzen. Bereits Leonardo dachte an solche Konstruktionen für die Mondbeobachtung: »Verfertige Augengläser, um den Mond groß zu sehen.« Anders als damals üblich, trennte Leonardo die Naturwissenschaft nicht von der Technik, sondern verknüpfte beide. Vermutlich lässt ihn gerade die Verbindung von Überlegungen und Umsetzung heute so visionär erscheinen.


Helles Licht überstrahlt Schilfrohre und lässt sie dünner erscheinen.

H. JOACHIM SCHLICHTING

Leonardo untersuchte ferner Phänomene, die über das rein Physikalische hinausgehen und physiologische Vorgänge betreffen. Dazu gehört eine Irradiation genannte optische Täuschung, die heute zudem bei Fotografien in Form einer lokalen Überbelichtung (»Blooming«) auftritt. Er bemerkte beim Betrachten der Sonne durch einen Baum, dass »alle Zweige, die vor der Sonnenscheibe liegen, so dünn sind« oder ganz überstrahlt werden (siehe Foto oben). An anderer Stelle heißt es: »Einst sah ich eine schwarz gekleidete Frau mit weißem Kopftuch; dieses Tuch schien doppelt so breit wie ihre Schultern zu sein, welche schwarz bekleidet waren.« Ähnliches bemerkte er bei einem glühenden Eisenstab: »Obwohl er überall gleich dick ist, erscheint er an der glühenden Stelle viel dicker.«

Leonardo hat außerdem weit reichende Erkenntnisse in der Hydrodynamik, Mechanik und Thermodynamik notiert, deren Bedeutung meist erst viel später klar wurde. Ebenso haben umfangreiche anatomische Studien sein künstlerisches Schaffen maßgeblich beeinflusst. Im Vergleich zu den übrigen Teilen seines Vermächtnisses sind Leonardos Untersuchungen im Bereich optischer Phänomene weniger bekannt. Doch als Grundlage seines Schaffens waren sie unverzichtbar – und sie sind ein eindrucksvolles Beispiel für die erstaunlichen Erkenntnisse, die ein wacher Geist den alltäglichsten Erscheinungen abringen kann.

QUELLEN

Chastel, A. (Hg.): Leonardo da Vinci: Sämtliche Gemälde und die Schriften zur Malerei. Schirmer-Mosel, 1990

Kemp, M.: Leonardo. C.H.Beck, 2004

Lücke, T. (Hg.): Leonardo da Vinci. Tagebücher und Aufzeichnungen. Paul List, 1940

INFORMATIK
KREATIVE COMPUTER

Inzwischen erschaffen fortgeschrittene Algorithmen eigenständig außergewöhnliche Bilder – ohne Zutun eines menschlichen Künstlers. Das revolutioniert bisherige Auffassungen von Kunst.



Ahmed Elgammal ist Professor für Computerwissenschaften und Direktor des Art and Artificial Intelligence Laboratory an der Rutgers University in New Jersey.

⏩ spektrum.de/artikel/1634766

Am 25. Oktober 2018 verkaufte das Auktionshaus Christie's in New York erstmals ein mittels künstlicher Intelligenz (KI) produziertes Kunstwerk – für umgerechnet mehr als 380 000 Euro. Das Gemälde mit dem Titel »Portrait of Edmond Belamy« ist Teil einer neuen Kunstform, die durch maschinelles Lernen entsteht. Die in Paris lebenden Künstler Hugo Caselles-Dupré, Pierre Fautrel und Gauthier Vernier hatten ein Computerprogramm mit tausenden Porträts gefüttert und es so die Grundprinzipien von Ästhetik »gelehrt«. Es kreierte daraufhin das hochpreisig verkaufte Bild, das ein deformiertes Gesicht zeigt.

»Das Gemälde ist nicht das Produkt eines menschlichen Geistes«, stand in der Beschreibung von Christie's. »Es wurde von künstlicher Intelligenz geschaffen, einem Algorithmus, der durch eine algebraische Formel definiert ist.« Wenn ein Computerprogramm eigenständig Bilder erzeugt, kann man das Ergebnis dann als Kunst bezeichnen? Wie stark muss ein Mensch ein Werk dafür mindestens beeinflusst haben?

Als Direktor des Art and Artificial Intelligence Laboratory an der Rutgers University in New Jersey habe ich mich mit solchen Fragen beschäftigt. Insbesondere interessiert mich, ab wann ein Mensch die Anerkennung an eine Maschine abtreten sollte.

In den letzten 50 Jahren gab es viele Künstler, die ihre Werke mit Hilfe von Algorithmen erzeugt haben. In dieser so genannten algorithmischen Kunst visualisiert man ein gewünschtes Ergebnis mit Hilfe eines Computers, indem man ihm detaillierte Befehle gibt. Einer der Ersten, der diese Kunstform praktizierte, war der britische Grafiker Harold Cohen, der 1973 das Programm AARON entwickelte. Die Software, die Cohen während seiner Karriere immer weiter nachbesserte, diktiert einer Maschine genaue Zeichenbewegungen.

In den letzten Jahren hat sich die Technologie allerdings weiterentwickelt. Inzwischen produzieren Computer mit KI-Programmen eigenständig Bilder. Sie folgen dabei keinen festen Regeln, sondern lernen das menschliche Ästhetikempfinden, indem sie tausende Kunstwerke analysieren.

Die meisten KI-Bilder entstehen aus einer bestimmten Klasse von Algorithmen, den »generative adversarial networks« (GANs), die Ian Goodfellow 2014 mit anderen Informatikern an der Université de Montréal während seiner Doktorarbeit entwickelte. Sie verdanken ihren Namen (»adversarial« heißt gegnerisch) den zwei separaten Teilen, aus denen sie bestehen: Während der eine Baustein Zufallsbilder erzeugt, lernt der andere über die Eingabe, wie man diese Bilder beurteilt, und wählt die besten aus.

Beabsichtigte Innovation oder Versehen?

Um ein KI-Kunstwerk zu schaffen, muss man also zuerst eine Sammlung von Bildern erstellen, mit denen man den Algorithmus speist. Das Programm versucht sie zu imitieren und kreiert mehrere eigene Exemplare. Aus den Ergebnissen pickt man diejenigen heraus, die man verwenden möchte.

Manchmal entstehen dabei Bilder, die selbst den Künstler überraschen, der den Prozess leitet. Beispielsweise produzierte das GAN von Caselles-Dupré, Fautrel und Vernier eine Reihe deformierter Gesichter, obwohl sie ihrem

AUF EINEN BLICK
IST DAS NOCH KUNST?

1. Schon seit Jahrzehnten nutzen Menschen Computer, um Kunstwerke zu schaffen.

2. Die neuen technischen Entwicklungen ermöglichen es nun Maschinen, eigenständig Bilder zu kreieren, ohne dass eine Person den Schaffensprozess steuert oder gar kontrolliert.

3. Maschinelles Lernen kann außerdem dabei helfen, kunstgeschichtliche Zusammenhänge offenzulegen oder die kreative Leistung eines Werks zu bewerten.

AHMED ELGAMMAL, ART & AI LAB RUTGERS UNIVERSITY



Das Computerprogramm AICAN hat dieses Bild generiert und »St. George Killing the Dragon« genannt. Das KI-Kunstwerk wurde bei einer Auktion im November 2017 für 16000 US-Dollar versteigert.

Programm gewöhnliche Porträts gezeigt hatten. Wie soll man solche unerwarteten Ergebnisse bewerten?

Dabei hilft uns die Theorie des britisch-kanadischen Psychologen Daniel E. Berlyne, der mehrere Jahrzehnte lang das menschliche Empfinden von Ästhetik untersuchte. Er fand heraus, dass Innovation, Überraschung, Komplexität, Mehrdeutigkeit und Exzentrizität die stärksten Reize von beliebten Kunstwerken ausmachen. Die deformierten KI-Porträts erfüllen einige dieser Eigenschaften, denn sie sind sowohl innovativ als auch überraschend und exzentrisch. Sie erinnern an die berühmten Bilder des britischen Malers Francis Bacon, etwa »Three Studies for a Portrait of Henrietta Moraes«. Viele Menschen sind jedoch der Meinung, dass im Unterschied dazu den maschinell gefertigten Gesichtern etwas fehlt: die Absicht.

Während es Bacons Ziel war, seine Gesichter zu verformen, entstanden die ungewöhnlichen KI-Porträts aus Versehen. Hier hat es der Algorithmus nicht geschafft, ein menschliches Gesicht richtig nachzuahmen. Dennoch hat Christie's genau diese Art von Bild zu einem Schwindel erregenden Preis versteigert.

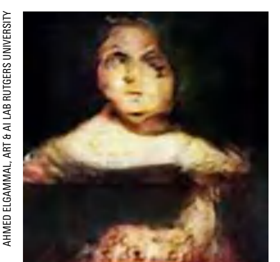
Nicht allen gefällt die neue Kunstform. Der berühmte US-amerikanische Kunstkritiker und Pulitzer-Preisträger Jerry Saltz sagte etwa in einem Interview mit dem kanadischen Lifestyle-Magazin »Vice«, er finde KI-Bilder wie »The Butcher's Son« von Mario Klingemann (siehe Bild S. 71)

langweilig und stumpf. In manchen Fällen mögen Kritiker wie er Recht haben. Die deformierten Porträts von Caselles-Dupré, Fautrel und Vernier etwa sind wirklich nicht allzu interessant: Es handelt sich dabei um reine Imitationen von vorab verarbeiteten Eingaben.

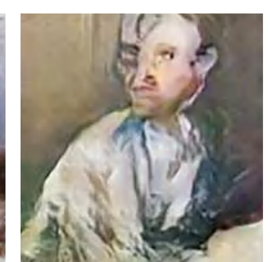
Allerdings sollte man nicht bloß das Endergebnis beurteilen, sondern auch den kreativen Prozess, bei dem Mensch und Maschine zusammenarbeiten, um neue visuelle Formen zu erschaffen. Künstler können nämlich auf vielfältige Weise mit KI-Programmen spielen. Für ihre Animation »Fall of the House of Usher« nutzte Anna Ridler Standbilder aus einer 1929 erschienenen Verfilmung der gleichnamigen Kurzgeschichte von Edgar Allan Poe. Sie fertigte Tuschezeichnungen dieser Bilder an und speiste sie in ein GAN ein, das eine Reihe neuer Gemälde hervorbrachte, die sie dann zu einem Kurzfilm zusammenschnitt. Ein weiteres Beispiel ist das von Saltz als langweilig titulierte »The Butcher's Son«, bei dem Klingemann seinem Algorithmus Figuren aus Stöcken und pornografische Bilder übergeben hatte.

Selbst wenn die computergenerierten Ergebnisse häufig überraschen, kommen sie nicht aus dem Nichts: Hinter ihnen steckt ein aufwändiger Prozess, der sicherlich auch

AHMED ELGAMMAL, ART & AI LAB RUTGERS UNIVERSITY





Als Forscher einen Algorithmus mit Porträtzeichnungen der letzten fünf Jahrzehnte speisten, entstanden eine Reihe neuer Kunstwerke, die deformierte Gesichter zeigen. Auch wenn sie innovativ wirken, fehlt hinter diesen Bildern jedoch eine Absicht.

KI als Kunstkritiker

Damit eine KI selbstständig neuartige Bilder produziert, muss sie lernen, wie Menschen Kreativität definieren. Zusammen mit meinen Kollegen habe ich deshalb einen Algorithmus entwickelt, der erkennt, welche Kunstwerke in den letzten 500 Jahren besonders originell waren und spätere Arbeiten nachhaltig beeinflusst haben.

Mit Hilfe von maschinellem Sehen (englisch: computer vision) haben wir ein Netzwerk etlicher Gemälde aufgebaut, die zwischen dem 15. und dem 20. Jahrhundert entstanden. Um durch diesen unübersichtlichen Datenwust zu navigieren, nutzten wir eine Klasse von Algorithmen, die unter anderem bei der Untersuchung sozialer Interaktionen, Epidemieanalysen und Websuchen weit verbreitet sind. Beispielsweise verwendet Google derartige Programme, um diejenigen Webseiten auszuwählen, die am relevantesten für einen Suchbegriff sind.

In unserem Fall analysiert der Algorithmus zuerst die visuellen Eigenschaften der Bilder (Farbe, Textur, Perspektive und Thema) und vergleicht sie mit ihrem Entstehungsdatum. Anschließend bewertet er ihre jeweilige Kreativität, indem er beurteilt, wie originell sie sind und wie stark sie spätere Werke beeinflusst haben. Bis auf das Entstehungsdatum erhält das Programm keinerlei Informationen.

Tatsächlich stimmen die Einschätzungen unserer Software häufig mit etablierten Expertenmeinungen überein. Als wir sie 1700 verschiedene Gemälde bewerten ließen, stufte sie zum Beispiel die Kreativität von Edvard Munchs »Schrei« (1893) viel höher ein als die Werke seiner damaligen Kollegen. Ebenso gab der Algorithmus Picassos »Les Demoiselles d'Avignon« (1907) die höchste Kreativitätsbewertung aller Gemälde zwischen 1904 und 1911, die er analysierte.

Natürlich gibt es auch Fälle, in denen das Programm nicht zum gleichen Urteil kommt wie Kunsthistoriker. Woher wissen wir also, dass es trotzdem funktioniert? Als Test führten wir so genannte Zeitmaschinenexperimente durch, bei denen wir einzelne Kunstwerke vor- oder nachdatierten und überprüften, wie sich die neu entstehenden Kreativitätswerte von den ursprünglichen unterschieden.

So fanden wir heraus, dass Gemälde aus dem Impressionismus, Postimpressionismus, Expressionismus und Kubismus deutlich besser abschneiden, wenn ihr Entstehungsdatum auf 1600 vorverlegt wird. Neoklassische Bilder gewinnen in diesem Fall hingegen nicht viel. Genau dieses Ergebnis hatten wir erwartet, denn der Neoklassizismus gilt als Wiederbelebung der Renaissance. Werke aus der Renaissance und dem Barock erleiden dagegen nach 1900 Verluste bei ihren Kreativitätswerten.

Mit dieser Arbeit konnten wir zeigen, dass nicht bloß Menschen in der Lage sind, Kreativität zu beurteilen. Nun können auch Computer diese Aufgabe erfüllen – und sind dabei sogar objektiver.

eine gewisse Form von Absicht enthält. Deshalb betrachte ich solche Werke als Konzeptkunst. In dieser in den 1960er Jahren entstandenen Kunstform ist die Idee hinter einer Arbeit wichtiger als das Endergebnis. Mit meiner Meinung stehe ich offenbar nicht allein da. »The Butcher's Son« wurde beispielsweise 2018 mit dem Lumen Prize ausgezeichnet, der digitaler Kunst gewidmet ist.

In all den Beispielen erzeugte zwar ein Algorithmus die KI-Kunstwerke, doch immer unter der Leitung eines Menschen. Der Künstler trifft eine Vorauswahl an Bildern, passt das Programm bei Bedarf an und sucht am Ende die besten Ergebnisse aus. Aber was wäre, wenn ein Computer Kunst kreieren würde, ohne dass ihn ein Mensch beeinflusst? Diesem Gedanken folgend haben wir AICAN (artificial intelligence creative adversarial network) entwickelt, einen Algorithmus, der als nahezu autonomer Künstler gelten kann. Er lernt bestehende Stile sowie Definitionen von Ästhetik und erzeugt eigenständig, also ohne äußeres Zutun, innovative Bilder.

Um dem Programm unser ästhetisches Verständnis beizubringen, orientierten wir uns an einer Theorie des US-amerikanischen Psychologen Colin Martindale (1943–2008). Er hatte beobachtet, dass erfolgreiche Künstler oftmals Formen, Themen und Stile ablehnen, an die sich das Publikum bereits gewöhnt hat. Stattdessen ziehen sie die Aufmerksamkeit eines Betrachters auf ihr Werk, indem sie Neues kreieren.

Daher haben wir unseren Algorithmus zwei entgegengesetzten Einflüssen ausgesetzt. Auf der einen Seite versucht er, die Ästhetik bestehender Kunstwerke zu erlernen, während er andererseits dafür bestraft wird, wenn seine eigenen Bilder einem bereits etablierten Stil zu nahe kommen. Weil zu viel Innovation wiederum abschreckt, stellten wir sicher, dass die entstehenden Werke zwar neuartig sind, aber nicht zu stark von dem abweichen, was als akzeptabel angesehen wird. Im Idealfall schafft das Programm etwas Neues, das auf herkömmlichen Stilen aufbaut. Da unsere KI auch die Namen der ihr vorgesetzten Kunstwerke lernt, benennt sie sogar ihre eigenen Bilder. Eines heißt beispielsweise »Orgie«, ein anderes »The Beach at Pourville«.

Ein Computerprogramm als eigenständiger Künstler?

Zudem kann AICAN die Kreativität seiner Produkte im kunsthistorischen Kontext bewerten (siehe »KI als Kunstkritiker«, links). Dabei zeigte sich, dass es einen abstrakten Stil bevorzugt. Weil das Programm innovativ sein soll, baut es wahrscheinlich auf neueren Trends wie der abstrakten Kunst auf, die erst im 20. Jahrhundert modern wurde (siehe »Kunstgeschichte aus Sicht einer Maschine«, S. 72).

Unsere Rolle als menschliche Künstler rückt dabei noch weiter in den Hintergrund, als es bei KI-Kunst sowieso schon der Fall ist. So wählen wir nicht etwa bestimmte Bilder aus, um einem Programm wie AICAN Ästhetik beizubringen, sondern füttern es mit 80000 verschiedenen Werken, die den westlichen Kunstkanon der letzten 500 Jahre repräsentieren. Auf Knopfdruck erstellt das Programm dann eigene Bilder, die uns in ihrer Raffinesse und Variation oft überraschen.



Das preisgekrönte KI-Kunstwerk »The Butcher's Son« von Mario Klingemann wurde auch hart kritisiert.

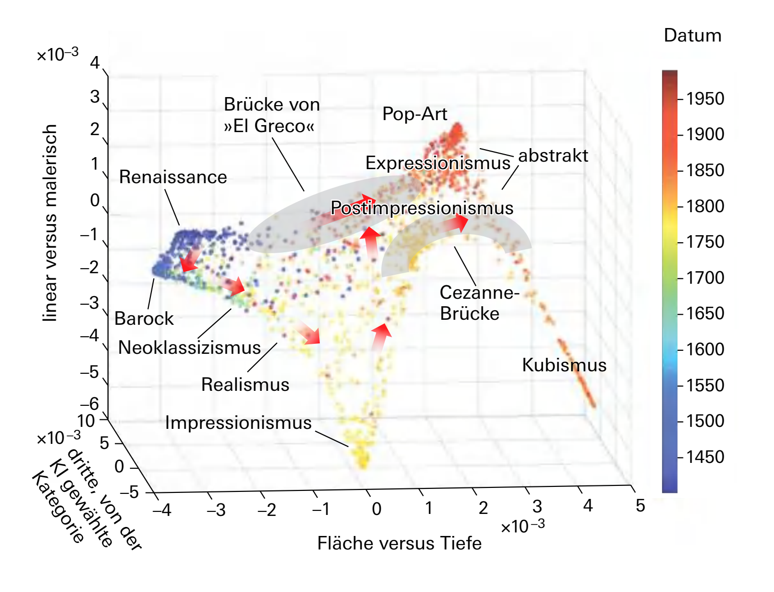
AHMED ELGAMMAL, ART & AI LAB RUTGERS UNIVERSITY

Um herauszufinden, wie andere Menschen auf die Werke von AICAN reagieren, stellten wir 2016 auf der internationalen Kunstmesse Art Basel die KI-generierten Bilder zusammen mit solchen menschlicher Künstler aus. Für jedes davon fragten wir die Besucher, ob sie glaubten, dass es von einer Maschine oder einem Menschen stammt. Überraschenderweise konnten die meisten keinen Unterschied ausmachen: In 75 Prozent der Fälle dachten die Besucher, AICANs Bilder seien durch menschliche Hand entstanden.

Doch sie taten sich nicht bloß schwer damit, die computergenerierte Arbeit als solche zu erkennen. Das Publikum genoss die KI-Kunstwerke, viele beschrieben sie als »voll visueller Struktur«, »inspirierend« oder »kommunikativ«.

Ab Oktober 2017 stellten wir Bilder von AICAN in Frankfurt, Los Angeles, New York und San Francisco aus. Dabei hörten wir immer wieder die gleiche Frage: Wer ist der Künstler? Als Wissenschaftler habe ich den Algorithmus zwar entwickelt, allerdings halte ich mich aus dem gesamten Schaffensprozess heraus. Das Programm wählt den Stil, das Motiv, die Komposition, die Farben und die Textur seiner Bilder aus. Deshalb nannten wir ausschließlich

Kunstgeschichte aus Sicht einer Maschine



Zusammen mit Kollegen vom College of Charleston in South Carolina hat meine Arbeitsgruppe untersucht, wie Computer die Arbeit von Kunsthistorikern erleichtern und ergänzen können.

Wir brachten den Maschinen bei, Bilder durch visuelle Merkmale zu unterscheiden. Dabei stützten wir uns auf die Theorie des Schweizer Kunsthistorikers Heinrich Wölfflin (1864–1945), der Bilder nur gemäß ihrer formalen Eigenschaften einordnete und nicht wie seine Vorgänger auch Inhalt und Ausdruck berücksichtigte. Wölfflin gelang es so, Renaissance und Barock durch fünf Schlüsselprinzipien zu unterscheiden: linear/malerisch, Fläche/Tiefe, geschlossen/offen, Vielheit/Einheit, Klarheit/Unklarheit.

Wir übergaben unserem Programm 80000 digitalisierte Bilder ohne jegliche Zusatzinformationen über den Künstler, das Entstehungsdatum oder die Genrezuordnung. Der Algorithmus ordnete sie bloß nach Wölfflins Schlüsselprinzipien an.

Überraschenderweise erklären schon Wölfflins erste beide Unterscheidungen zwischen linear/malerisch und Fläche/Tiefe den kunsthistorischen Verlauf. Als wir die Kunstwerke nach diesen vier Eigenschaften sortierten, bildete sich ihre korrekte Entstehungsgeschichte ab. So fanden wir auch heraus, warum das Programm bestimmte Künstler als unverwechselbare Repräsentanten ihrer Stile ausgewählt hat: Ihre Werke markieren Extrempunkte entlang der auf jeden Stil abgestimmten Dimensionen.

In den Ergebnissen bilden zum Beispiel Cézannes Werke eine Brücke zwischen Impressionismus und Kubismus. Diese Einschätzung teilen Kunsthistoriker, die Cézanne als Schlüsselfigur für den Stilwechsel zur abstrakten Kunst des 20. Jahrhunderts sehen. In den computergenerierten Daten lässt sich im Postimpressionismus außerdem eine Verzweigung erkennen: Die Werke von Cézanne grenzen sich deutlich von anderen Stücken aus jener Zeit ab. Der »Cézanne-Zweig« verbindet sich dann mit frühen kubistischen Bildern von Picasso und Braque sowie mit abstrakten Gemälden von Kandinsky.

Insgesamt kann die Kunstgeschichte von den neuesten Entwicklungen im maschinellen Lernen profitieren. Sie könnte so zu einer prädiktiven Wissenschaft werden, in der Computerprogramme grundlegende Muster und Trends offenbaren, die für das menschliche Auge gar nicht ersichtlich sind.

AICAN als Urheber. Als 2017 AICANs »St. George Killing the Dragon« (siehe Bild S. 69) bei einer Auktion in New York für 16000 US-Dollar verkauft wurde, ging der größte Teil des Erlöses an die Rutgers University und das Institut des Hautes Études Scientifiques in Frankreich.

Dennoch fehlt etwas im künstlerischen Prozess der KI: Auch wenn die Bilder ansprechend erscheinen, entstehen sie ohne sozialen oder gesellschaftlichen Hintergrund. Menschliche Künstler lassen sich hingegen von Personen, Orten und Politik inspirieren. Sie schaffen Kunst, um Geschichten zu erzählen und die Welt zu verstehen.

Kuratoren können jedoch die KI-Kunstwerke nachträglich in einen gesellschaftlichen Kontext einbetten. Das haben wir mit »Alternative Facts: The Multi Faces of Untruth« getan. So nannten wir eine Reihe von KI-generierten Porträts, die uns durch ihre Aktualität überrascht haben. ◂

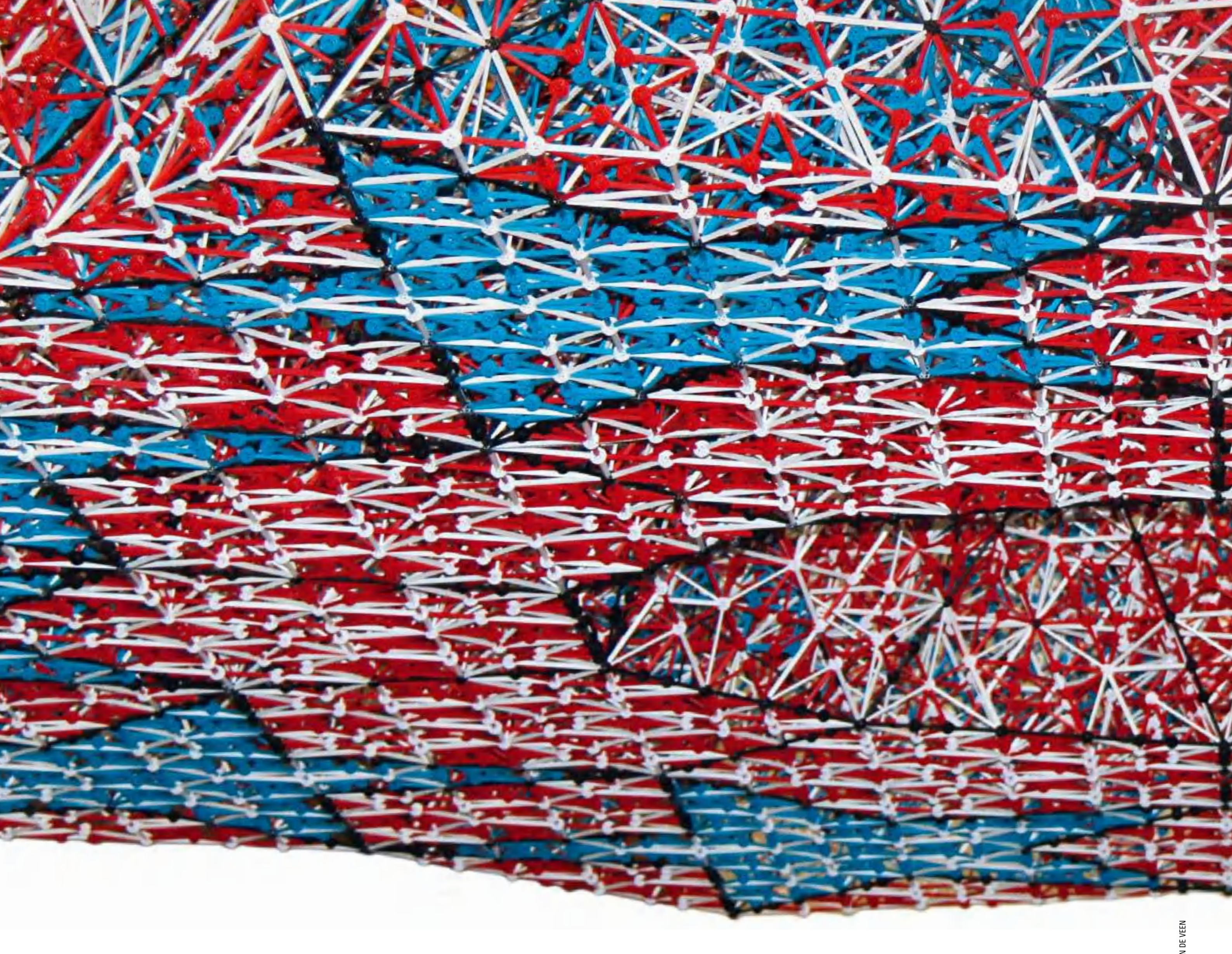
QUELLEN

Elgammal, A. et al.: The shape of art history in the eyes of the machine. ArXiv 1801.07729, 2018

Elgammal, A. et al.: CAN: Creative adversarial network, generating »art« by learning about styles and deviating from style norms. ArXiv 1706.07068, 2017

Elgammal, A. et al.: Quantifying creativity in art networks. ArXiv 1506.00711, 2015





MIT FRDL. GEN. VON PAUL GERARD VAN DE VEEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
TAPETENFUNKTIONEN

Aus der Überlagerung ganz gewöhnlicher periodischer Funktionen entstehen die merkwürdigsten Muster, darunter sogar nichtperiodische Quasikristalle.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

spektrum.de/artikel/1634768

Mathematiker haben das so an sich: Sie verwenden eine sehr abstrakte und komplizierte Darstellung für Dinge, die man auch viel einfacher ausdrücken könnte. Der Lohn der Mühe kommt dann später und vor allem an unerwarteter Stelle. Die abstrakte Formulierung erlaubt Verallgemeinerungen, auf die man in der ursprünglichen Form nie gekommen wäre. Zum Beispiel ist es von einer gewöhnlichen Tapete zu der sehr ungewöhnlichen geometrischen Anordnung, die man als »Quasikristall« zu bezeichnen pflegt, gedanklich ein weiter Weg. Aber ein wenig mathematische Abstraktion hilft ihn bahnen.



PentiDisc, ein Quasikristall nach einem Entwurf von Fabien Vienne, erstellt von Teilnehmern der Tagung »Bridges« in Enschede unter Leitung von Paul Gerard van de Veen. Das fertige Werk wog 120 Kilogramm und schwebte wie ein Damoklesschwert neun Meter über dem Publikum. »Ein Drahtseilakt auf einem sehr dünnen Faden«, schreibt van de Veen, weil die Ausführenden – Mathematiker und bildende Künstler – sich wenig um Sicherheitsbestimmungen scherten. Das kleine Bild oben rechts zeigt die fünf in ein Dodekaeder eingepassten Würfel, von denen jeder die »Urzelle« eines Würfelgitters bildet.

Die gemeine Tapete ist heute nur noch selten zu finden. In den 1960er Jahren pflegte man die Wände der guten Stube mit Mustern aus großen Blumen zu bekleben, die sich nach oben und unten ebenso wie nach rechts und links getreulich wiederholten und möglichst gut mit dem röhrenden Hirsch überm Wohnzimmersofa harmonierten. Die einfache mathematische Beschreibung einer Tapete läuft auf die Theorie der kristallografischen Gruppen in der Ebene hinaus (siehe **Spektrum** März 2014, S. 68): Man packt jede der großen Blumen in ein Quadrat derart, dass alle diese Vierecke zusammen die Ebene lückenlos und überlappungsfrei bedecken. So gesehen, ist die Tapete prinzipiell nichts anderes als eine Kachelung der Wand mit lauter gleichen Kacheln (auf das Material kommt es dem Mathematiker nicht an).

Wenn die Tapete tatsächlich so gemustert ist wie ein regelmäßiges Quadratgitter nach Art des klassischen Badezimmerfußbodens, dann gibt es zwei aufeinander senkrecht stehende Vektoren mit der Eigenschaft, dass das ganze Muster bei Verschiebung um einen dieser Vektoren in sich selbst übergeht (»translationsinvariant ist«). Und wenn es mit quadratischen Kacheln nicht geht, dann mit solchen in Form eines Parallelogramms.

So weit die einfache Beschreibung. Die komplizierte fasst dieselbe Tapete als ein großes Bild auf, das – zum Beispiel – aus lauter Pixeln zusammengesetzt ist. Jedes Pixel hat eine Position, die durch seine Koordinaten x und y bestimmt wird, und einen Farbwert, der sich durch eine oder mehrere Zahlen ausdrücken lässt. Man hat also eine Vorschrift, die jedem Punkt (x, y) einen Farbwert zuordnet, sprich eine Funktion. Und nun muss man sich auch nicht mehr auf einzelne Bildpunkte beschränken. Vielmehr dürfen x und y jeden reellen Wert annehmen, innerhalb des Bildrahmens oder auch darüber hinaus: In der abstrakten Welt ist jede Tapete im Prinzip unendlich ausgedehnt. Und dass sie aus lauter gleichen Kacheln besteht, ist jetzt eine Eigenschaft der Tapetenfunktion: Sie ist periodisch bezüglich der beiden Verschiebungsvektoren.

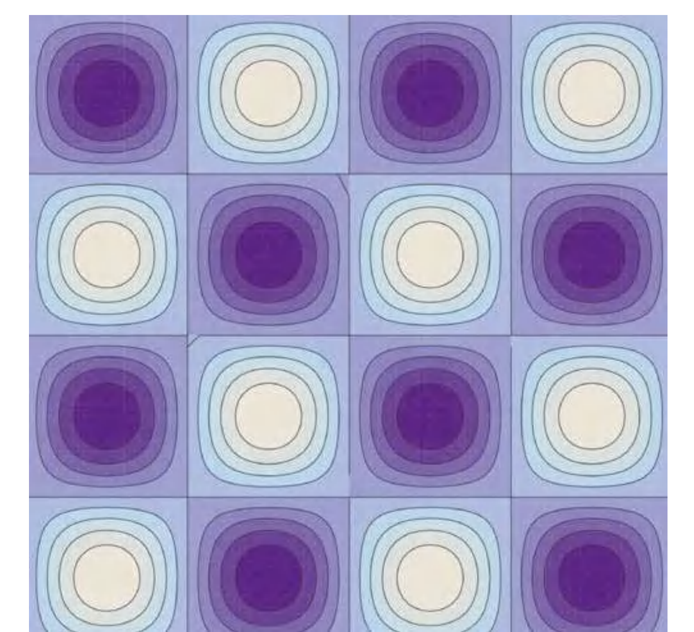
Mit periodischen Funktionen kennen sich vor allem die angewandten Mathematiker aus, allerdings in einem anderen Kontext: akustische Signale. Was wir als einen Ton hören, ist ein Schalldruck, der periodisch in der Zeit immer wieder dieselben Werte annimmt. Und so, wie man einen Ton in Grund- und Oberschwingungen zerlegen kann, lässt sich auch jedes periodisch wiederholte Bild als eine Überlagerung von Sinus- und Kosinusfunktionen auffassen. Dabei hat man noch gewisse Freiheiten, wie man die Zahlenwerte, die eine Tapetenfunktion liefert, in Farbwerte übersetzt. Wenn es nicht auf den Bildinhalt, sondern auf die allgemeine Form ankommt, bietet es sich an, den reellen Zahlen, die vorkommen, von der kleinsten bis zur größten die Farben des Regenbogens zuzuordnen, wie Elias Wegert das in seinen »komplexen Schönheiten« praktiziert (siehe **Spektrum** August 2018, S. 74), oder die Zahlen in Größenklassen einzuteilen und jedem solchen Intervall eine Farbe zu geben. Oder man entnimmt den Farbwert einem anderen Bild, zum Beispiel dem Foto einer Landschaft, und findet dann dieses Motiv mannigfach und verzerrt in der Tapete wieder (siehe Bilder S. 79).

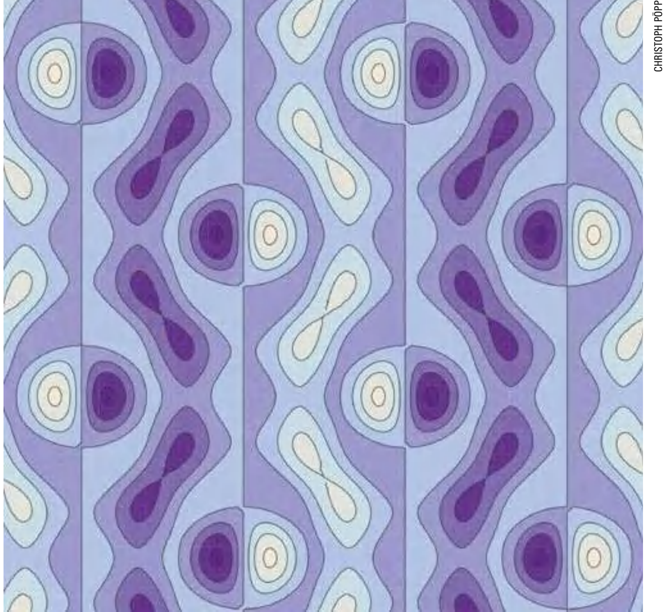
Periodische Funktionen bauen

Damit die Tapete in x- wie in y-Richtung periodisch ist, muss das auch für ihre Funktion gelten. Aber das ist nicht schwierig zu bewerkstelligen. Eine Funktion wie $f(x, y) = \sin x \sin y$ erfüllt bereits diese Anforderung (siehe Bild unten links), und $f(x, y) = \cos x + \sin 2x \sin 3y + \cos 3x \cos 2y + \sin 4x \sin y$ ist schon nicht mehr ganz so langweilig anzusehen (siehe Bild unten rechts).

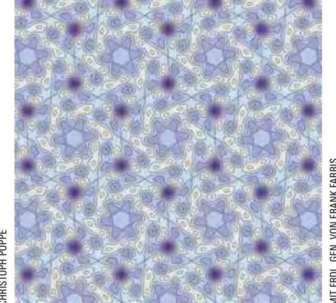
Interessanterweise zeigen die Bilder sogar mehr Symmetrien, als man bestellt hat. So geht die linke Tapete nicht nur bei Verschiebung um eine ganze Kachellänge, die hier gleich der halben Bildbreite ist, in sich selbst über, sondern auch, wenn man sie um je eine halbe Breite nach rechts und nach oben verschiebt. Obendrein gibt es Spiegelsymmetrien, allerdings muss man zusätzlich zum Spiegeln an einer horizontalen oder vertikalen Achse hell und dunkel (positiv und negativ) vertauschen.

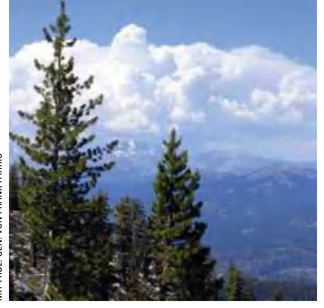
Bei diesen beiden Tapetenfunktionen werden die Funktionswerte auf sehr einfache Weise in Farben umgesetzt: Der gesamte Wertebereich (links von –1 bis 1, rechts von –4 bis 4) wird in zehn Intervalle eingeteilt, und jedes Intervall bekommt einen Farbton, der von dunkel für die kleinsten bis hell für die größten Werte variiert. Jedes der beiden Bilder zeigt genau 2 mal 2 Kacheln.





CHRISTOPH PÖPPE


CHRISTOPH PÖPPE


MIT FRDL. GEN. VON FRANK FARRIS


MIT FRDL. GEN. VON FRANK FARRIS

Die linke Abbildung zeigt die Tapete zu der Funktion $f(x,y,z) = \sin x \sin 2y \cos 3z + \sin 2x \cos 3y \sin z + \cos 3x \sin y \sin 2z$ in der Ebene, die durch die Gleichung $x + y + z = 0$ definiert ist. Die Farbgebung ist die gleiche wie in den Bildern unten links. Bei der rechten Abbildung hat der Mathematiker Frank Farris die Farbgebung der dreizählig-symmetrischen Tapete aus einem echten Landschaftsfoto (Mitte) erzeugt.

Frank A. Farris, Professor für Mathematik an der Santa Clara University in Kalifornien, hat sich intensiv mit Tapetenfunktionen und deren Symmetrien befasst. Für ihn sind die üblichen Tapetenmuster, auch solche mit dieser oder jener Spiegelsymmetrie, nicht mehr als eine Aufwärmübung. Spannender wird es bei den komplizierteren Symmetrien, die in den kristallografischen Gruppen vorkommen. Das sind vor allem Drehungen um ein Drittel oder ein Sechstel des Vollwinkels sowie die zugehörigen Spiegelungen.

Farris bewältigt diese Dreier- und Sechsersymmetrien auf einem originellen Umweg: über die dritte Dimension. Statt die Ebene mit Quadraten zu pflastern, füllt er den Raum mit Würfeln und sucht Funktionen, die in jedem dieser Würfel dasselbe Bild bieten. Solche dreifach periodischen Funktionen dreier Variablen sind nicht schwer zu finden. Für den Anfang liefert $f(x, y, z) = \sin x + \sin y + \sin z$ ein geeignetes Beispiel. Und wie oben darf man Terme wie $\sin 2x$ oder $\cos 5z$ – genauer: eine Variable mal eine ganze Zahl, darauf angewandt die Sinus- oder die Kosinusfunktion – nach Belieben kombinieren.

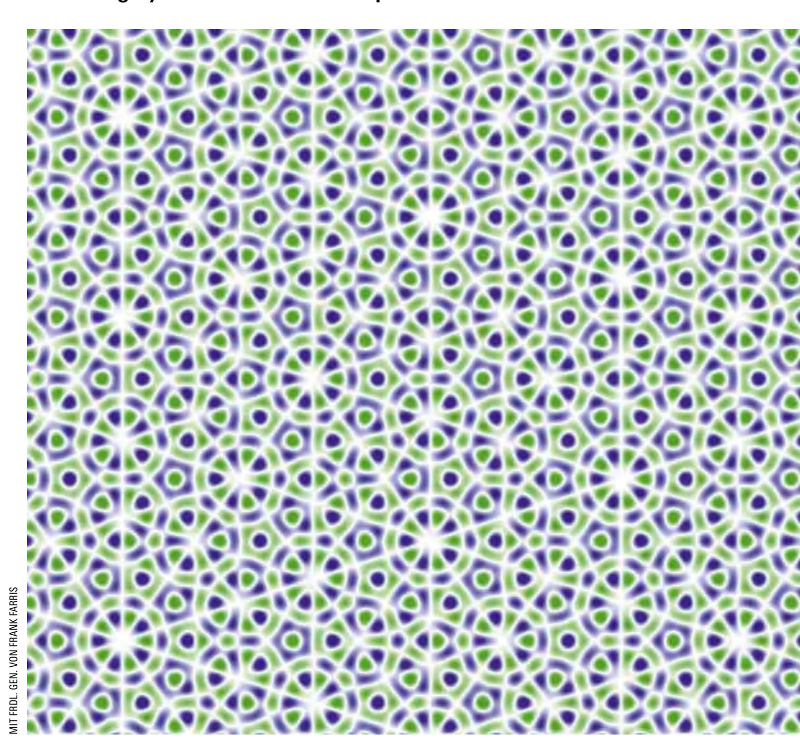
Um am Ende eine dreizählige Symmetrie zu erhalten, muss man jedoch die Tapetenfunktion symmetrisch bezüglich jeder zyklischen Permutation der drei Variablen wählen, das heißt, sie muss genauso aussehen wie zuvor, wenn man x durch y, y durch z und z durch x ersetzt. Ein nichttriviales Beispiel ist $f(x, y, z) = \sin x \sin 2y \cos 3z + \sin 2x \cos 3y \sin z + \cos 3x \sin y \sin 2z$.

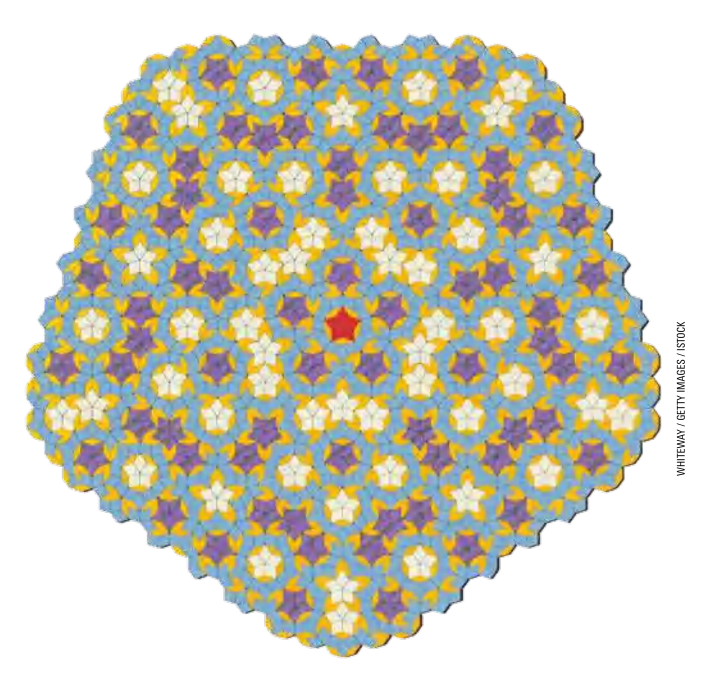
Nun greife man aus dem ganzen Raum eine Ebene heraus, und zwar diejenige, die durch die Endpunkte aller drei Einheitsvektoren geht. Das sind die Punkte, die man erhält, wenn man vom Ursprung des Koordinatensystems einen Schritt nach rechts, nach hinten beziehungsweise nach oben geht. Die Ebene ist schief in jeder Hinsicht; aber die drei genannten Punkte bilden auf ihr ein gleichseitiges Dreieck, und unsere Funktion bleibt unverändert, wenn wir das Dreieck und mit ihm die ganze Ebene um 120 Grad drehen. Diese Aktion ist nämlich nichts weiter als die oben genannte zyklische Permutation der drei Variablen.

Also bildet unsere Funktion auf dieser Ebene ein dreizählig-symmetrisches Muster (siehe Bild links und rechts oben). Außerdem ist es nach wie vor eine Tapete, das heißt, es ist periodisch bezüglich zweier aufeinander senkrecht stehender Vektoren. Denn unsere Ebene geht nicht nur durch die drei Punkte, die sie definieren, sondern außerdem durch unendlich viele Gitterpunkte; das sind die Eckpunkte der Füllung mit den Würfeln. Und da die ursprüngliche Funktion laut Voraussetzung an jedem Gitterpunkt gleich aussieht, muss das ebenso für ihre Einschränkung auf die schiefe Ebene gelten.

Das ist alles ganz nett, geht jedoch nicht über das hinaus, was man auch durch mehrfache Anwendung von Verschiebungen, Drehungen und Spiegelungen auf eine »Urkachel« erreichen kann. Farris kommt nun auf etwas wirklich Neues, indem er zwei Dimensionen höher steigt: in den fünfdimensionalen Raum. Dort scheitert zwar unser anschauliches Vorstellungsvermögen, aber die Mathematik funktioniert weitgehend unverändert.

Fünfzählig-symmetrische Pseudotapete von Frank Farris.


MIT FRDL. GEN. VON FRANK FARRIS



Diese Penrose-Pflasterung der Ebene lässt sich bis ins Unendliche fortsetzen. Sie ist fünfzählig-symmetrisch um ihren Mittelpunkt; und obwohl immer wieder die gleichen Motive auftauchen, wird sie niemals periodisch.

Wieder kann man Tapetenfunktionen definieren, die periodisch in jeder von fünf Variablen sind. Zudem sollen sie unverändert bleiben, wenn man jede Variable durch ihre Nachfolgerin und die letzte durch die erste ersetzt (zyklische Permutation). Dann betrachtet man die Tapetenfunktion eingeschränkt auf die Ebene, die durch die Endpunkte der fünf Einheitsvektoren geht. Diese ist wieder zweidimensional und damit der Anschauung zugänglich. Sie ist durch die fünf genannten Punkte eindeutig bestimmt, die auf ihr ein regelmäßiges Fünfeck bilden. Das Muster, das sich dabei ergibt (siehe Bild S. 77 unten), ist fünfzählig-symmetrisch; so ist es konstruiert.

Aber es ist keine Tapete! Das ist auch gar nicht möglich, denn fünfzählige Symmetrie und doppelte Periodizität vertragen sich grundsätzlich nicht. Keine der 17 kristallografischen Gruppen enthält eine Drehung um 72 Grad, was einem Fünftel des Vollwinkels entspricht. Nur: Warum sieht das Muster dann so tapetenartig aus? Wieso finden sich dieselben fünfzählig-symmetrischen Bildelemente an so vielen Stellen wieder?

Einerseits ist die Tapetenebene im fünfdimensionalen Raum schiefer als ihre dreidimensionale Kollegin. Bis auf die fünf Punkte, durch die sie definiert ist, trifft sie überhaupt keinen Gitterpunkt. (Auch in fünf Dimensionen kann man verallgemeinerte Würfel lückenlos stapeln und erhält ein Gitter aus deren Eckpunkten). Zur Erklärung lässt sich anführen, dass $\tau = (\sqrt{5}+1)/2$, die Zahl des goldenen Schnitts, die bei fünfzähliger Symmetrie stets vorkommt, »so irrational« ist, dass sie weitere Treffer verhindert.

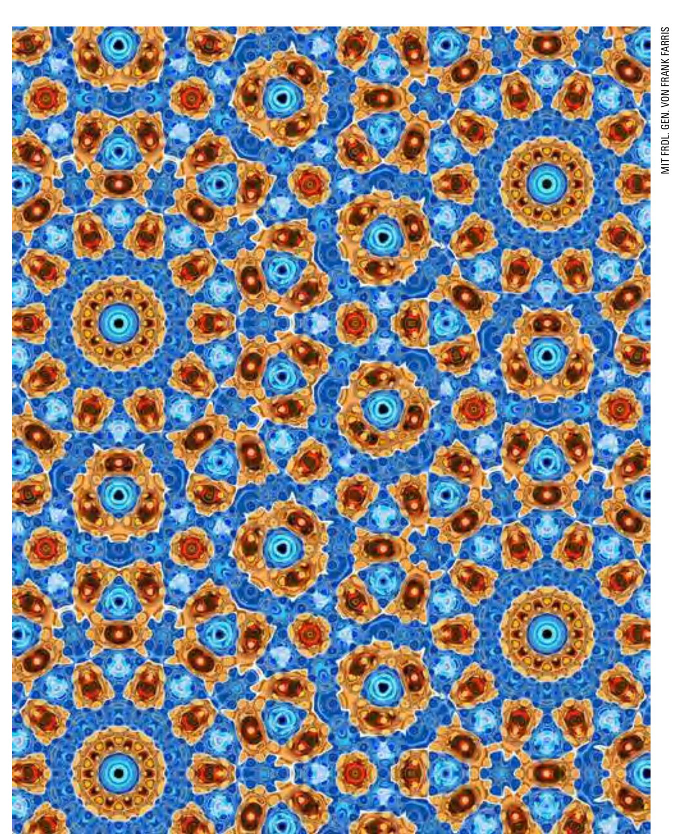
Andererseits verfehlt die Tapetenebene manche Gitterpunkte nur sehr knapp. In der Umgebung einer solchen Stelle sieht das Muster zwar nicht genauso aus wie bei einem Treffer, ist diesem aber zum Verwechseln ähnlich. Man kann die Zahl τ niemals durch einen Bruch ausdrücken, kommt ihr mit Brüchen allerdings beliebig nahe, und zwar indem man ein Glied der Fibonacci-Folge 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 … durch seinen Vorgänger teilt. Solchen Näherungswerten entsprechen die Fast-Treffer in der fünfzähligen Pseudotapete. Die wiederum liegen nicht in gleichen Abständen über die Ebene verteilt, sondern irgendwie auf regelmäßige Weise unregelmäßig.

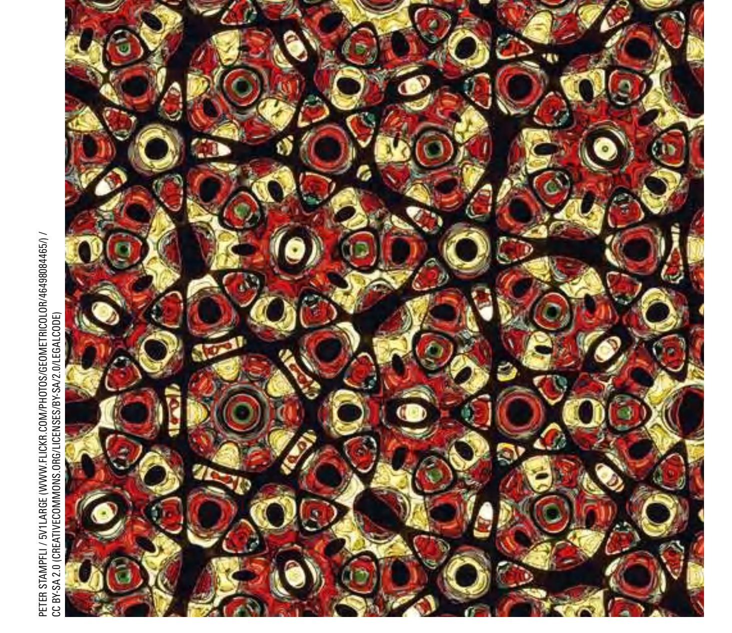
Ein genialer Kunstgriff macht nun aus den angenäherten Treffern perfekte und damit aus einer ungefähren Wiedergabe eines Musters eine genaue: Man projiziert alle Gitterpunkte, die hinreichend nahe an der Tapetenebene liegen, auf die Ebene selbst und verbindet die Projektionsbilder zweier Gitterpunkte durch eine Kante, wenn diese Gitterpunkte benachbart sind, das heißt zu einer Kante eines Gitterwürfels gehören. Was »hinreichend nahe« bedeutet, will zwar sorgfältig definiert werden; aber im Prinzip ist es auch im fünfdimensionalen Raum kein Problem, den Abstand zweier Punkte zu berechnen. Und einen Punkt P auf eine Ebene zu projizieren heißt, den Punkt der Ebene zu wählen, der P am nächsten liegt.

Was dabei herauskommt, ist nichts weniger als das berühmte Penrose-Muster aus dicken und dünnen Rauten, das als zweidimensionales Analogon eines Quasikristalls intensiv studiert wurde (siehe Bild links). In der Tat ist die Projektion aus dem fünfdimensionalen Raum eines der bedeutendsten Hilfsmittel, um nichtperiodischen Pflasterungen der Ebene, insbesondere dem Penrose-Muster, auf die Spur zu kommen (siehe **Spektrum** Februar 2002, S. 64).

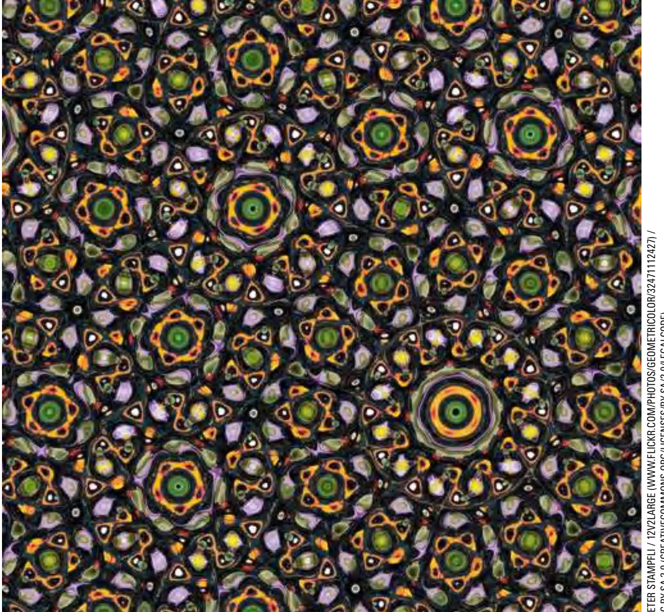
Mitte der 1980er Jahre war Peter Stampfli, damals an der Freien Universität Berlin, auf eine ganz ähnliche Idee gekommen: Man nehme zwei Gitter aus regelmäßigen

Zwölfzählig-symmetrische Pseudotapete von Frank Farris, Farbgebung nach einem echten Foto.





Fünfzählig-symmetrische Pseudotapete von Peter Stampfli, Farbgebung nach einem echten Foto.



Zwölfzählig-symmetrische Pseudotapete von Peter Stampfli, Farbgebung nach einem echten Foto.

Sechsecken (»Bienenwaben«), sagen wir eines aus Papier und darüber eines aus transparenter Folie, und hefte sie mit einem Reißnagel im Mittelpunkt eines der Sechsecke zusammen. Wenn man das eine gegen das andere um 60 Grad verdreht, kommen beide Gitter wieder genau miteinander zur Deckung. Dreht man um genau den halben Winkel, also 30 Grad, so fallen hier und da einzelne Sechsecke mehr oder weniger genau zusammen. Wenn man deren Mittelpunkte miteinander verbindet, ergibt sich eine nichtperiodische Pflasterung der Ebene, die inzwischen als »Stampfli tiling« in die Literatur eingegangen ist.

Unmögliche Tapeten

Offensichtlich hat das Thema Stampfli nicht losgelassen. Mehr als 30 Jahre später greift er seine Ideen von damals zusammen mit dem Ansatz von Frank Farris wieder auf. Im Gegensatz zu damals erlaubt die Leistung der Computer mittlerweile die Erstellung zahlreicher eindrucksvoller Bilder, mit fünfzähliger Symmetrie wie bei Farris (siehe Bild oben links) ebenso wie mit der zwölfzähligen, die sich beim Überlagern der beiden Bienenwabenmuster ergibt (siehe Bild oben rechts). Eine umfangreiche Bilderschau mitsamt detaillierten Erläuterungen hat Stampfli auf www.geometricolor.wordpress.com bereitgestellt. Und unter www.geometricolor.ch/waves.html kann jeder Benutzer ein Bild seiner Wahl hochladen und eine Pseudotapete daraus machen.

Bemerkenswerterweise lässt sich das Farris-Prinzip der »unmöglichen Tapete« von zwei auf drei Dimensionen übertragen: Dazu verdreht man mehrere räumliche Gitter geeignet gegeneinander und macht die Punkte, in denen sich zwei Gitter »ungefähr« treffen, zu Punkten einer nichtperiodischen Pflasterung des Raums. Das kommt den echten Quasikristallen, die ja nichtperiodische Anordnungen von Atomen im Raum mit – zum Beispiel – fünfzähliger Symmetrie sind, schon ein bisschen näher.

Der französische Architekt Fabien Vienne (1925–2016) hat dieses Konzept für spezielle Würfelgitter ausgearbeitet. Und zwar passen fünf Würfel mit ihren Ecken genau in die Ecken eines regulären Dodekaeders. Setzt man jeden dieser fünf Würfel zu einem unendlichen Gitter im Raum fort, so finden sich zahlreiche Ungefähr-Treffpunkte.

Paul Gerard van de Veen aus Enschede in den Niederlanden, Lehrer und begeisterter Geometrie-Bastler, hat 2013, als die jährlich stattfindende Mathematik-Kunst-Tagung »Bridges« in seiner Heimatstadt gastierte, Viennes Konzept in monumentaler Form umgesetzt: Teilnehmer der Tagung steckten in Gemeinschaftsarbeit aus Kugeln und Stäben des Geometriebaukastens »Zometool« ein mehrere Meter großes Stück aus diesem Quasikristall zusammen (siehe Bilder S. 74 und 75).

Und wozu ist diese ganze hübsch anzusehende Mathematik nutze? Eigentlich ist die Frage ja unzulässig; aber diesmal gibt es sogar eine konkrete Antwort. Eine Gruppe fernöstlicher Wissenschaftler hat im Jahr 2018 die erwähnten beiden gegeneinander verdrehten Bienenwabenmuster aus real existierendem Kohlenstoff hergestellt: zwei Schichten aus Graphen, das bekanntlich im Sechseckgitter angeordnet ist. Und in diesem zweidimensionalen Quasikristall haben die Forscher tatsächlich interessante elektrische Eigenschaften gefunden. Für das Titelbild der zugehörigen Ausgabe von »Science« hat die Grafikerin Stampflis Uraltprogramme von damals ausgegraben. ◂

QUELLEN

Ahn, S. J. et al.: Dirac electrons in a dodecagonal graphene quasicrystal. Science 361, 2018

Farris, F. A.: Forbidden symmetries. Notices of the American Mathematical Society 59, 2012

Farris, F. A., Lanning, R.: Wallpaper functions. Expositiones Mathematicae 20, 2002

LITERATURTIPP

Farris, F. A.: Creating symmetry: the artful mathematics of wallpaper patterns. Princeton University Press, 2015

Farris erklärt die Mathematik hinter den schönen Mustern.

PERSIEN
WIE EIN WELTREICH FUNKTIONIERT

Tausende von Tontafeln aus Persepolis und etliche Schriftfunde aus den Provinzen belegen: Das altpersische Imperium war beeindruckend effizient organisiert. Was paradoxerweise seinem Gegner Alexander dem Großen in die Hände spielte.



Der Historiker und Philologe **Wouter Henkelman** lehrt an der École Pratique des Hautes Études (EPHE) in Paris. Seine Interessen gelten dem achämenidischen und dem elamischen Reich. Unter anderem erforscht er in einem internationalen Team das »Festungsarchiv« von Persepolis.

spektrum.de/artikel/1625450

Alexanders Soldaten waren erschöpft und hungrig. Auf dem Weg von Indien nach Babylon durchquerte ein Teil der Armee das wüstenhafte Landesinnere Gedrosiens (siehe Spektrum Spezial Archäologie Geschichte Kultur 1.19, S. 24/25), ein anderer zog an dessen feuchtheißer Küste entlang. Eine unwirtliche Region, die das Heer dezimieren sollte. Doch dann habe man an einem Ort im Landesinneren reichlich Nahrung vorgefunden, berichtete der griechische Historiker Arrian von Nikomedeia (2. Jahrhundert n. Chr.). Zudem ließ Alexander weitere Lebensmittel im ganzen Land eintreiben und befahl den Einheimischen, gemahlenen Weizen, Datteln und Schafe herbeizubringen. Ein Teil davon sollte auf Lasttiere verladen werden, um das Truppenkontingent an der Küste zu versorgen.

Viele Soldaten starben durch die Entbehrungen, aber dank der Maßnahmen blieb eine Katastrophe aus. Was Forschern heutzutage Rätsel aufgibt: Woher stammten all die Lebensmittel, die das karge Gedrosien kaum hatte hervorbringen können? Arrians Schilderung lässt vermuten, Alexanders Armee habe sich bei den Notvorräten der Bevölkerung bedient. Allein die gut 30000 Soldaten hätten 28 bis 38 Tonnen Mehl täglich benötigt, dazu kamen Frauen, Kinder, Pferde und Lasttiere. Somit lag der Tagesbedarf an Getreide bei mehr als 50 Tonnen, nach einigen Schätzungen sogar bei 175 Tonnen. Daraus Mehl zu gewinnen, erforderte überdies Arbeitskräfte und entsprechende Werkzeuge. Auch Vieh und Datteln setzten, sollte eine ganze Armee davon leben, eine auf Überschuss ausgerichtete Viehzucht sowie professionell betriebene Dattelplantagen mit organisierter Bestäubung, Ernte und Lagerung voraus.

Liest man zwischen den Zeilen, gab es eine »institutionelle Landschaft«, das heißt eine etwa durch Bauten und Verkehrswege sichtbar gewordene Reichsverwaltung der Achämeniden (siehe »Kurz erklärt«, S. 83). So existierte offenbar ein Netz staatlich organisierter Getreidespeicher und Lagerhäuser, großer Viehherden und Plantagen, dazu gut ausgestattete Arbeiter und ein Verteilungssystem. Was bei Arrian wie eine Fußnote der Geschichte klingt, illustriert einen wenig beachteten Aspekt des gesamten Feldzugs: Ohne ein gut organisiertes persisches Versorgungsnetzwerk hätte Alexander der Große das angeblich so marode Imperium wahrscheinlich gar nicht erobern können.

AUF EINEN BLICK
DIE MUSTERGÜLTIGE ADMINISTRATION VON PERSEPOLIS

1. Das »Festungsarchiv« von Persepolis aus mehreren tausend Tontafeln und Tafelfragmenten liefert detaillierte Informationen zur wirtschaftlichen Organisation im Kernland des altpersischen Reichs.

2. Beispielsweise sorgte eine hierarchisch strukturierte Verwaltung dafür, dass ausreichend Lebensmittel erzeugt und gelagert sowie mit Kamelen auf sicheren Fernstraßen befördert werden konnten.

3. Schriftfunde aus Ägypten, Arachosien und Baktrien belegen: Periphere Provinzen arbeiteten nach demselben Muster. Altorientalisten gehen davon aus, dass dort vergleichbare Verwaltungszentren existierten.





Diese Tontafeln aus dem »Festungsarchiv« von Persepolis verraten, dass einst eine große Gruppe Reisende mitsamt Kamelen und Maultieren von Ghandara nach Susa unterwegs war. Die Keilschrifttexte beschreiben, was Mensch und Tier als Proviant erhielten. Dazu kommen Informationen über weitere Details der Reise wie die Wegstrecke und notwendige Genehmigungen.





2 cm









WOUTER HENKELMAN

Wer Aufbau und Funktionsweise dieser Infrastruktur erforscht, findet in Verwaltungsdokumenten aufschlussreiche Informationen. Die größte bekannte Sammlung stammt aus dem königlichen Bezirk von Persepolis, einem der wirtschaftlichen und politischen Zentren des achämenidischen Kernlands, der Persis (siehe »Kurz erklärt«, rechts). 1933 hatten Archäologen des Oriental Institute der University of Chicago das »Festungsarchiv« in zwei Gewölben des Mauersystems der Terrasse entdeckt. Die Gewölbe hatten der Verwaltung offenbar als Lagerräume für ihre Akten gedient. Als Alexanders Soldaten Feuer legten, begruben einstürzende Mauern das Archiv. Der Schutt bewahrte 7000 bis 8000 vollständige Keilschrifttafeln und noch verwertbare Fragmente vor dem Zahn der Zeit (die Zahl kleinerer Bruchstücke und schlecht erhaltener Tafeln geht in die Zehntausende).

Von 1937 bis zu seinem Tod im Jahr 1980 untersuchte der Chicagoer Assyriologe Richard Hallock die einzigartige Sammlung fast im Alleingang, 2005 hat ein internationales Team diese Aufgabe übernommen. Es rekonstruiert die Keilschriftzeichen, übersetzt, publiziert und kommentiert die Texte. Dank des Festungsarchivs hat sich unser Bild vom altpersischen Reich radikal verändert.

Die meisten Dokumente sind in Elamisch verfasst, das spätestens seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. im Südwesten des heutigen Iran gebräuchlich war. Als Elam im 6. Jahrhundert v. Chr. im achämenidischen Reich aufging, übernahmen die neuen Herrscher nicht nur sein Knowhow in Sachen Verwaltung und Ökonomie, sondern behielten Elamisch auch als Sprache der Administration bei.

Altpersisch, Elamisch und Aramäisch fließend, Phrygisch und Griechisch erwünscht

Außer den elamischen Texten enthält das Festungsarchiv etwa 850 Dokumente in Aramäisch – einer Sprache, die man spätestens im Zuge der Eroberung aus Babylonien übernommen hatte. Sie wurde für den reichsweiten Schriftverkehr verwendet, aber insbesondere in Persepolis auch von dessen Beamten. Dabei zeigen falsche grammatikalische Konstruktionen und sprachliche Vereinfachungen in den elamischen Texten, dass die Muttersprache der meisten Altpersisch war; das Gleiche gilt wohl für einen Teil der Autoren der aramäischen Texte. Vereinzelte Dokumente in Altpersisch, Phrygisch und Griechisch unterstreichen den Eindruck eines komplexen sprachlichen Umfelds im Regierungsbezirk von Persepolis.

Die meisten der Tafeln wurden mit einem Siegelabdruck versehen. Sie identifizierten einst beispielsweise Getreidehändler, Priester, Vorarbeiter und anderes mehr. Gut 5000 gesiegelte Tafeln tragen keine Schrift, waren aber vermutlich über Schnüre mit Textdokumenten verknüpft. Die Abdrücke entsprechen heutigen Unterschriften und Stempeln, sie sind mithin Ausdruck administrativer Macht.

Trotz seiner Zuständigkeit für die Persis bietet das Festungsarchiv auf Grund seiner Größe und Komplexität sowie der zentralen Bedeutung von Persepolis für das gesamte Reich Einblicke in viele Aspekte der achämenidischen



In der Antike bildeten Dromedare das Rückgrat des Warentransports durch die trockenen Regionen des persischen Weltreichs. Dementsprechend wird ihre Haltung und Zucht in Verwaltungsdokumenten immer wieder erwähnt.

WOUTER HENKELMAN

Kurz erklärt

Achämeniden Das Herrschergeschlecht wurde der Legende nach von Achaimenes um 700 v. Chr. begründet. Um 500 v. Chr. erstreckte sich ihr Reich von Gebieten Osteuropas bis nach Indien. Um dieses riesige Imperium direkt regieren zu können, unterhielten die Großkönige zumindest in der Persis und in Nachbarregionen Residenzen, die der Hofstaat bereiste.

Persis Die heute in der iranischen Provinz Fars gelegene Satrapie war das Kernland der Achämeniden. Von dort hatte diese Dynastie im 6. Jahrhundert v. Chr. expandiert, und in der Persis befanden sich die wichtigen Königsresidenzen Pasargadei und Persepolis.

Satrapie Eine weitgehend autonome Provinz des altpersischen Reichs, die meist einem Statthalter, dem Satrapen, mit weit reichenden Machtbefugnissen, mitunter auch einem lokalen Fürsten unterstellt war. Insbesondere in der Peripherie des Reichs repräsentierten die Satrapen die Zentralregierung. Alexander der Große und seine Nachfolger behielten diese Struktur bei.

Kultur und Gesellschaft. Die meisten der elamischen Texte stammen aus der Zeit von 509 bis 493 v. Chr., entstanden also unter Dareios I., der das Imperium neu organisierte und in Satrapien unterteilte (siehe »Kurz erklärt«, oben).

Auch die Persis war eine Satrapie und hatte das übliche Führungstrio von Satrap, Garnisonsführer und Schatzmeister. Im Festungsarchiv sammelte sich sozusagen Papierkram der Verwaltung: Listen zur Verteilung von Viehfutter, Lebensmittelrationen für Zehntausende von Lohnarbeitern, Zuweisungen von Vorräten für Reisende auf den Königsstraßen, Zuteilungen für die Tafel des Königs und der Königin, Aufstellungen über Opfergaben für die Götter. Dabei repräsentiert die Sammlung nur einen Teil dessen, was persische Beamte zu bearbeiten hatten. Denn das Festungsarchiv erfasst zwar wichtige Produkte wie Getreide, Bier, Wein, Obst und Vieh hinsichtlich Produktion, Lagerung und Transport. Doch obwohl laut den Futterlisten Hunderttausende von Schafen gehalten wurden, finden sich keine Angaben zur Produktion von Wolle beziehungsweise von Textilien.

Im Osten grenzte die Persis an die Provinz Karmanien. Mehrmals erwähnen Tontafeln des Archivs einen Satrapen namens Karkisch. Offenbar war dieser regelmäßig in der Persis unterwegs. Unter anderem hielt er sich häufig in einem Ort namens Paishiyauvada im Südosten der Satrapie auf. Einige Archäologen identifizieren den Ort mit der Ausgrabungsstätte Tal-e Zohak nahe der heutigen Stadt Fasa, einem mehr als 20 Meter hohen Siedlungshügel mit an Funden reicher Umgebung. Dort war der britisch-ungarische Archäologe Sir Aurel Stein schon 1934 auf eine Lehmziegelplattform aus achämenidischer Zeit gestoßen, zudem gut 350 Meter vom Hügel entfernt auf eine kunstvoll gearbeitete Säule, wie man sie in einem Palast erwartete. Dass Karkisch dem Festungsarchiv zufolge auf seinen Reisen von schwer bewaffneten Truppen begleitet wurde, erklärt sich durch die Lage des Orts: Paishiyauvada bewachte einen der Hauptwege in der Region, der an das Verbindungsnetz nach Indien angeschlossen war.

Ähnlich verhielt es sich mit Purusch. Allem Anschein nach war Karmanien in Verwaltungsbezirke untergliedert, und Purusch gehörte zu den administrativen Zentren. Es wird heutzutage mit Poura gleichgesetzt, das Arrian als »basileia« Gedrosiens bezeichnete, als königliches Zentrum, Verwaltungszentrale und Militärstützpunkt jener Satrapie. Erstreckte sich der Zuständigkeitsbereich Karkischs über ein Gebiet, das vom äußersten Rand der Persis bis in den Südosten des heutigen Iran reichte?

Für diese Machtfülle gäbe es eine plausible Erklärung: Es war offenbar Aufgabe dieses Satrapen, das Netz der Königsstraßen zu überwachen, die das achämenidische Kernland mit seinen östlichen Provinzen verbanden. Zur Zeit Dareios' I. waren das: Arachosien und Ghandara, beide zu Teilen im heutigen Afghanistan und Pakistan gelegen, sowie Hindush im Nordwesten Indiens. In diesen Regionen tauchen Reisende im Festungsarchiv immer wieder auf. Karkisch hatte wohl dafür zu sorgen, dass sie sicher unterwegs waren, sich nicht verirren konnten und mit allem Nötigen versorgt wurden.

Wie wichtig die Großkönige gut funktionierende Verbindungen gen Osten nahmen, bezeugt eine weitere ungewöhnliche Konstruktion des 5. Jahrhunderts v. Chr.: Ein Satrap namens Bagaios herrschte, so ist den Tontafeln zu entnehmen, über die Inseln des Persischen Golfs, sicherlich fiel auch der Seeweg zum indischen Subkontinent in seine Verantwortung. Vermutlich war er Karkisch unterstellt. Der Reichtum der Großkönige beruhte offenbar nicht auf der radikalen Ausbeutung unterworfener Gebiete, sondern vielmehr auf deren Einbindung in ein gut vernetztes Wirtschaftssystem mit ausgefeilter Hierarchie.

Kamellogistik: Klotzen statt kleckern

Es überrascht somit nicht, dass Kamele im Festungsarchiv häufig erwähnt werden: Die anspruchslosen und ausdauernden Tiere waren auf den Handelsrouten nach Ägypten, in die Levante, zur Arabischen Halbinsel, nach Südmesopotamien und Indien ein wichtiger Bestandteil der Logistik. Dementsprechend große Zahlen verzeichnen die elamischen Texte. Da ist mal von einer 200-köpfigen Herde die Rede, dann von einem Zuchtbetrieb mit 435 Stück. Mal geht es um reine Bestandsverwaltung, dann um die Weiden. Es gab Tiere, die zu den Landgütern des Königs selbst gehörten. Selbst »Straßenkamele« tauchen auf – wohl schnelle Dromedare für die Kuriere des Herrschers.

Wieder kommt Arrians Bericht in den Sinn: Damit Alexanders Heermeister Lebensmittel über große Distanzen heranschaffen konnten, sogar für die entlang der Küste ziehenden Truppenteile, hätten die Satrapen der Provinzen Areia und Parthien jedem Offizier und jedem Unteroffizier



UNIVERSITY OF CHICAGO / ORIENTAL INSTITUTE

Dieser Stößel, vermutlich aus grünem Hornstein, war Teil des Schatzes von Persepolis und stammt aus der Satrapie Arachosien. Er ist in Aramäisch beschriftet, unter anderem mit dem Namen der Werkstatt und des Verfassers. Das Artefakt unterstreicht die Bedeutung des Aramäischen in der altpersischen Administration.

Kamele und andere Transporttiere geschickt. Quintus Curtius Rufus, ein römischer Biograf des Welteroberers, ergänzte dazu, der parthische Satrap hätte zubereitete Lebensmittel auf Kamele laden lassen, als er von der Notlage der Armee erfuhr. Auch durch solche bruchstückhaften Informationen schimmert ein gut strukturiertes imperiales Netzwerk durch. Beispielsweise waren bereits zubereitete Lebensmittel im heißen und feuchten Klima des südlichen Iran länger haltbar als frische Produkte. Und dass es möglich war, eine große Zahl von Tieren in kurzer Zeit zur Verfügung zu stellen, setzte ein hoch entwickeltes System der Logistik und Tierzucht voraus.

Die zeitliche Lücke zwischen den elamischen Dokumenten und diesen Schilderungen antiker Biografen überbrücken teilweise Texte aus anderen Gebieten des Reichs. Zum Beispiel besitzt ein privater Sammler aramäische Schriften aus Baktrien, darunter den Brief eines Akhvamazda, Mitte des 4. Jahrhunderts v. Chr. Satrap von Baktrien. Darin kritisierte Akhvamazda eine Gebühr für königliche Kameltreiber. Man erfährt dabei, dass diesem Berufsstand Rinder, Vieh und Land zur Verfügung standen, wohl um eine Kontinuität der Zucht und Beweidung der Tiere und damit den Karawanenverkehr selbst abzusichern.

Die Dokumente aus Baktrien behandeln zahlreiche weitere Wirtschaftsfragen und verraten Forschern die Strukturen und Hierarchien, Begrifflichkeiten und Protokolle der jeweiligen Administration. Ganz offensichtlich hatte man in den Provinzen ähnliche Institutionen etabliert wie im Kernland, und diese funktionierten gut 150 Jahre nach Daraios I. immer noch.

Mehr noch: Der förmliche Ton der baktrischen Briefe, die Art, wie das Leder gefaltet und versiegelt wurde, sowie einige sprachliche Besonderheiten ähneln dem ebenfalls aramäischen Schriftverkehr eines gewissen Arschama. Dieser war in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. Chr. Satrap von Ägypten. Die Einheitlichkeit lässt zentralisierte Schreiberschulen vermuten und bestätigt die Annahme reichsweiter Modelle der Administration nach dem Muster von Persepolis.

In dessen »Schatzhaus« hortete man Tribute, die von den Satrapien entrichtet wurden. Ihr Transport in die Persis taucht in Dokumenten des Festungsarchivs auf, doch wie die Abgaben erstellt wurden, verrät eine andere Quelle: Bei Grabungen in den Ruinen des Schatzhauses waren Teller, Mörser, Stößel und andere Objekte aus einem harten grünen Stein, vermutlich Hornstein, ans Licht gekommen. Auf den meisten wurden aramäische Worte mit Tinte geschrieben, zum Beispiel Namen, Orts- und Jahresangaben.

Eine Hierarchie von Schatzmeistern

Analysen verraten, dass es sich um Tribute aus Arachosien handelt, das in den Inschriften mehrmals erwähnt wird. Des Weiteren sprechen sie für ein Netz von befestigten Produktionszentren; jedes wurde von einem Präfekten und seinem Unterschatzmeister verwaltet. Sie alle standen unter der Aufsicht des »Schatzmeisters von Arachosien«, der letztlich die Produktion der Steinobjekte und ihren Export nach Persepolis verantwortete. Das entspricht der Hierarchie von »Reichsschatzhäusern« – tatsächlich handelte es sich eher um Werkstätten – in der Persis, an deren Spitze ein zentraler Schatzmeister stand, der in Persepolis residierte.

Gut 60 Dokumente des Festungsarchivs über den Transport von Tributen bestätigen die Vermutung der Wissenschaftler: Arachosien war wie die Persis auf Verwaltungsebene in kleinere Gebiete unterteilt. Damit das funktionierte, gab es wahrscheinlich Beamte mit überregionalen Befugnissen, beispielsweise Inspektoren und Gutachter, welche die Produktionskapazität vor Ort einschätzten oder dafür Sorge trugen, dass gegebenenfalls Arbeiter und spezialisierte Handwerker aus anderen Teilen der Satrapie Engpässe ausglichen. Mit anderen Worten: Die institutionellen Strukturen der einzelnen Verwaltungs-



NATIONAL MUSEUM OF AFGHANISTAN / FAHIM RAHIMI (SF 1399)

Eine Tafel aus dem Archiv von Persepolis? Nein, dieses Fragment hat zwar alle entsprechenden Merkmale, aber es wurde in Afghanistan entdeckt, wo in achämenidischer Zeit Arachosien lag. Der Fund deutet auf ein ausgedehntes, jedoch einheitliches Reich hin, in dem die Verwaltungsstruktur von Persepolis allgemein als Vorbild diente.

bezirke Arachosiens waren auf vielfältige Weise miteinander verknüpft.

Unter den Mauern der Zitadelle von Alt-Kandahar, dem administrativen, politischen und militärischen Zentrum dieser Satrapie, entdeckten Archäologen zwei Tafelfragmente mit elamischer Keilschrift. Als die Taliban 1996 das Nationalmuseum Kabul plünderten, gingen beide zunächst verloren, doch eines wurde kürzlich im Lager des Museums wiederentdeckt. So klein es auch ist, hat es doch enorme Bedeutung (siehe Bild oben). Denn das Format, die Keilschrift und die wenigen erhaltenen Begriffe des Rechnungstextes entsprechen derart genau den Dokumenten des Festungsarchivs, als wäre das Artefakt in Persepolis ans Licht gekommen, nicht 3000 Kilometer weiter östlich. Ein Verwaltungsmitarbeiter der Persis hätte sich in der Administration Arachosiens mühelos zurechtgefunden. Und das lässt sich vermutlich auf eine Reihe von weiteren Provinzen übertragen.

Das Festungsarchiv und die bislang bekannten Dokumente aus anderen satrapischen Archiven helfen, eines der großen Rätsel der Geschichte zu lösen: Wie konnte Alexander der Große mit einem an Zahl unterlegenen Heer in nur wenigen Jahren ein riesiges Weltreich erobern, das mehr als zwei Jahrhunderte Bestand hatte? Die antiken Autoren verwiesen auf Alexanders militärisches Genie, auf sein Charisma und seine Gottgleichheit, aber auch auf die Dekadenz des persischen Hofes und die Unfähigkeit seines Königs. Doch selbst wenn all diese Schilderungen der historischen Wirklichkeit entsprochen hätten, genügen die Erklärungen nicht. Denn Soldaten müssen essen und trinken, sie benötigen Kleidung und Waffen. Die Militärgeschichte ist voll von Beispielen verlorener wie erfolgreicher Schlachten, bei denen die Sicherung des Nachschubs den Ausschlag gab (siehe »Brot, Fleisch, Pulver, Geld«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 1/2018, S. 34).

Der griechische Gelehrte Plutarch erzählte im 1. Jahrhundert n. Chr. dazu eine aufschlussreiche Anekdote. Der junge Alexander habe einst die persischen Botschafter am makedonischen Königshof nach den Längen der Straßen in ihrer Heimat und Einzelheiten ihrer Reiseroute ausgefragt. Es scheint durchaus plausibel, dass sich der Prinz tatsächlich über die Verhältnisse im achämenidischen Reich informierte – der Persienfeldzug stand schon bei seinem Vater auf der Agenda. Ob er es geplant hatte oder auf die Gegebenheiten vor Ort reagierte, das militärische Genie Alexanders äußerte sich auch darin, die ausgetüftelte Logistik der persischen Satrapien zum eigenen Vorteil zu nutzen. ◂

QUELLEN

Briant, P.: The empire of Darius III in perspective. In: Heckel, W., Trittle, L. (Hg.): Alexander the Great: a new history. Wiley-Blackwell, 2009

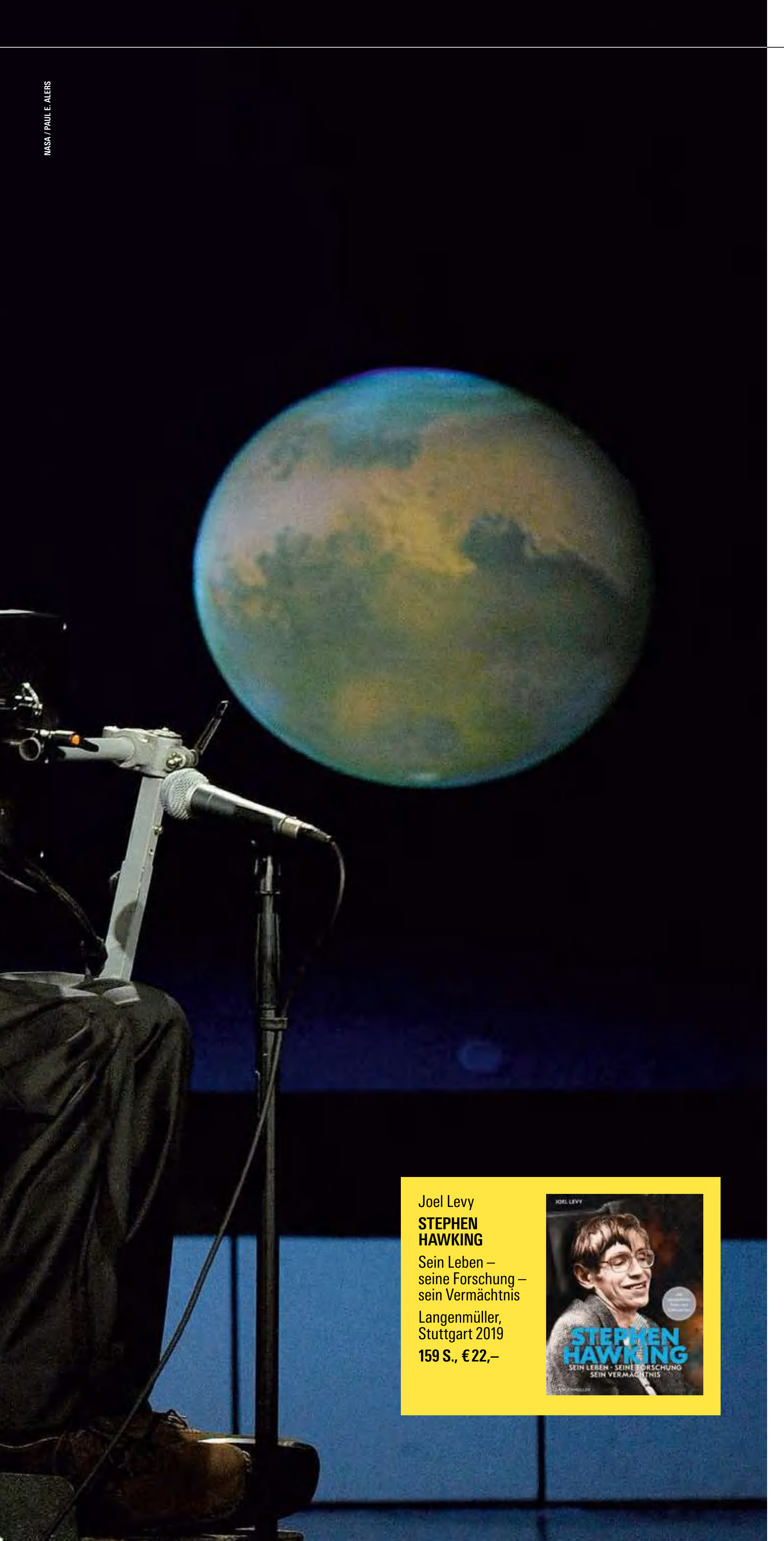
Henkelman, W.: Imperial signature and imperial paradigm Achaemenid administrative structure and system across and beyond the Iranian plateau. In: Jacobs, B. et al. (Hg.): Die Verwaltung im Achämenidenreich – Imperiale Muster und Strukturen. Classica et Orientalia 17. Harrasowitz, 2017

Kuhrt, A.: The persian empire: a corpus of sources from the Achaemenid period. Routledge, 2007

REZENSIONEN



Im April 2008, zum 50. Jahrestag der NASA, hielt Stephen Hawking eine Rede an der George Washington University. Darin begründete er, warum der Mensch ins All vorstoßen sollte.



NASA / PAUL E. ALERS

Joel Levy
STEPHEN HAWKING
Sein Leben – seine Forschung – sein Vermächtnis
Langenmüller, Stuttgart 2019
159 S., € 22,–

BIOGRAFIE
RÜCKBLICK AUF EINEN AUSNAHMEPHYSIKER

Fundamentale Forschungsthemen, Erzähltalent und der Kampf gegen eine übermächtige Krankheit – zusammen begründeten sie Stephen Hawkings Weltruhm.

Stephen Hawking (1942–2018) war ein Star und zu Lebzeiten der wohl berühmteste Physiker der Welt. Sein Kultstatus gründete auf einem Dreiklang: Hawking arbeitete über fundamentale Fragen zur Struktur des Kosmos; er trotzte in unglaublicher Weise seiner ALS-Erkrankung; und er verstand es, seine Themen öffentlichkeitswirksam und humorvoll einem breiten Publikum zu vermitteln. Ein Jahr nach seinem Tod legt der britische Wissenschaftsjournalist Joel Levy eine Biografie vor, die dem Ausnahmephysiker vermutlich gefallen hätte: mit kurz gehaltenen Texten und bunt bebildert.

Stephen Hawking wurde am 8. Januar 1942 in Oxford geboren, wohin die Familie aus London wegen des Krieges geflüchtet war. Früh fiel seine Intelligenz auf, doch ebenso eine gewisse Faulheit. Während der drei Jahre Studium in Oxford habe er nur etwa eine Stunde täglich gearbeitet, rechnete Hawking später einmal nach. Seine Noten waren aber gerade gut genug, um für die Doktorarbeit nach Cambridge zu gehen.

Dort promovierte er bei Dennis Sciama (1926–1999), einem Widersacher des berühmten Astrophysikers Fred Hoyle (1915–2001). Hoyle hatte im Rahmen seiner »Steady-State-Theorie« ein Schlupfloch der Urknalltheorie ausgenutzt, um ein ewiges statisches Universum zu postulieren, was Sciama heftig kritisierte. Hawking gelang es als Doktorand, einen Fehler in einer Abhandlung Hoyles aufzuspüren und mathematisch zu beweisen, dass im Urknall eine Singularität unvermeidlich ist. Sein wissenschaftlicher Aufstieg war damit vorgezeichnet.

In den folgenden Jahren beschäftigte sich Hawking mit Schwarzen Löchern. Bei Untersuchungen zu deren

Thermodynamik, Entropie und dem Informationsverlust am Ereignishorizont gelang ihm schließlich seine wohl bedeutendste Entdeckung: Schwarze Löcher sind auf Grund von Quanteneffekten nicht absolut schwarz, sondern strahlen sehr schwach und verlieren somit an Masse. Die Strahlung trägt deshalb Hawkings Namen. Sie experimentell nachzuweisen, ist allerdings extrem schwierig und bis heute nicht geglückt – ein wichtiger Grund, warum Hawking der Nobelpreis verwehrt blieb.

1988 erschien nach jahrelanger Arbeit Hawkings bekanntestes Buch »Eine kurze Geschichte der Zeit«. Es wurde ein Bestseller und machte Hawking weltberühmt. Mit charmantem Humor und ohne Mathematik schaffte der Physiker es, die moderne Kosmologie einem Millionenpublikum schmackhaft zu machen. Spätestens jetzt war er zur Person des öffentlichen Lebens geworden; seine Auftritte und Aussagen verfolgte sogar die Boulevardpresse.

Hawkings Name bietet eine ziemlich sichere Grundlage für stabile Verkaufszahlen, und so fiel dem Verlag die Entscheidung vermutlich leicht, diese Biografie über ihn zu publizieren. Die Aufmachung des Werks zielt auf weite Verbreitung. Die Seitengestaltung erinnert denn auch eher an eine Zeitschrift als an ein Buch: große Farbfotos, abgesetzte Kästen zu einzelnen Themen, wenig Text und natürlich keine Formeln. Man kann getrost schmökern und blättern – ein Ansatz, der aufgeht. Das Buch vermittelt einen guten und recht umfassenden Blick auf Hawking, sein Privatleben und seine wissenschaftliche Arbeit.

In einem wichtigen Punkt wird das Buch seinem Versprechen jedoch nicht gerecht: Die Versuche des Autors, Hawkings Lebenswerk inhaltlich zu erklären, bleiben weit hinter Hawkings eigenem Können zurück. Vielleicht ist der Vergleich unfair – aber die Lektüre hinterlässt oft das Gefühl des nicht ganz Schlüssigen. Das ist schade, da ja gerade die populärwissenschaftliche Vermittlung ein herausragendes Vermächtnis Hawkings ist.

Einen anderen Fehler, den man angesichts der bunten Gestaltung befürchten könnte, macht das Buch jedoch nicht: Hawking wird nicht glorifiziert. »Er mag nicht der größte Kosmologe seit Einstein sein oder der ersten Liga der modernen Physiker angehören ...«, schreibt Levy bereits in der Einführung kritisch. Diese wohltuende Distanz behält er bei.

Der Rezensent Stefan Gillessen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik.

Charles Darwin
DIE FAHRT DER BEAGLE
Darwins illustrierte Reise um die Welt
Theiss, Darmstadt 2019
480 S., € 28,–



WISSENSCHAFTS-GESCHICHTE
AUF DARWINS SPUREN

Auf einer Vermessungsfahrt mit dem Schiff »Beagle« gewann Charles Darwin entscheidende Erkenntnisse zur Evolution. Sein Reisetagebuch ist jetzt in einer Sonderausgabe erschienen.

1831 stach die »HMS Beagle« von England aus in See, um die Küsten Südamerikas zu vermessen. Mit an Bord war der damals 22-jährige Charles Darwin. Der Schiffskommandant Robert Fitz Roy hatte ihn engagiert, um »keine Gelegenheit zum Sammeln von nützlichen Informationen zu versäumen«.

Die »Beagle«-Expedition sollte eigentlich zwei Jahre dauern, woraus dann aber fast fünf wurden – erst 1836 kehrte das Schiff zurück. Es lief unter anderem Südamerika, die Galapagosinseln, Tahiti, Neuseeland, Australien und die Kokosinseln an. Überall dort ging Darwin an Land, untersuchte Tiere, Pflanzen und geologische Strukturen. Die Beobachtungen, die er dabei machte, ließen ihn schon bald vermuten, dass die Arten veränderlich sind. Sie inspirierten ihn zu seiner Evolutionstheorie, die er allerdings erst viel später – mehr als 20 Jahre danach – veröffentlichte.

Darwin verarbeitete seine Reiseerlebnisse in dem Buch »Journal and Remarks« (1839), das 1845 in einer überarbeiteten zweiten Fassung erschien. Diese ist ins Deutsche übertragen worden und jetzt als illustrierte Sonderausgabe herausgekommen. Das gelungen übersetzte, vorsichtig gekürzte und üppig bebilderte Werk erlaubt es, auf Darwins Spuren zu wandeln und jene Forschungsreise nachzuerleben, die laut seiner eigenen Aussage »das bei Weitem bedeutendste Ereignis« seines Lebens war.

Den größten Teil des Buchs nehmen Darwins Naturbeobachtungen ein. Intensiv widmet er sich der Fauna und Flora in den bereisten Gebieten und beschreibt diverse Arten. Das ist biologisch interessant, packend und lebendig geschrieben, und es liest sich oft sehr witzig: »Mehr als einmal habe ich gesehen, wie ein Guanako, wenn man sich ihm näherte, nicht nur wieherte und schrie, sondern auch in der lächerlichsten Art und Weise umherstolzierte und sprang, offenbar als trotzige Herausforderung.« Wiederholt denkt Darwin über die Verbreitungsgebiete von Tierarten nach. Er fragt sich etwa, warum Autoren, die Südamerika vor ihm bereist hatten, bei bestimmten Spezies eine andere Verbreitung beschrieben hatten, als er sie vorfand.

Eingehend befasst sich der Naturforscher mit Landschaften, geologischen Strukturen und klimatischen Verhältnissen. Er entwickelt Thesen dazu, wie die südamerikanischen Gebirgszüge, Täler und Ebenen entstanden sein könnten. Auch wundert er sich darüber, dass Gletscher, Eisberge und Dauerfrostboden auf der Südhalbkugel in erstaunlich niedrigen Breiten vorkommen, verglichen mit der nördlichen Hemisphäre.

Darwin diskutiert Muschelfunde auf Bergen, die Schichtenabfolge in Gebirgen oder Kiesablagerungen in Tälern. Daraus schließt er auf frühere Hebungen und Senkungen des Lands, auf zurückliegende Vulkanausbrüche und die Existenz früherer Meeresarme.

Zudem berichtet er über Fossilien, die er auf seinen Expeditionen fand, und versucht, sie zeitlich einzuordnen. Er spekuliert darüber, wie Tierpopulationen durch Landerhebungen getrennt werden können; diese »Verinselung« von Lebensgemeinschaften spielte eine wichtige Rolle in seiner späteren Evolutionstheorie, denn sie trägt zum Auffächern von Arten bei.

Ein langer Abschnitt widmet sich dem damals noch ungelösten Rätsel, wie Korallenriffe entstehen. Beim Besuch der Kokosinseln hatte Darwin solche Strukturen zu Gesicht bekommen. In seinem Buch stellt er eine Theorie auf, mit der er schlüssig erklären kann, welcher Mechanismus Saum- und Barriereriffe und schließlich Atolle hervorbringt. Dabei steht einmal mehr die Hebung und Senkung von Festland beziehungsweise von Inseln im Fokus.

Darwin stellte eine eigene Theorie zu Korallenriffen auf

Ausführlich beschreibt Darwin die Indigenen in den bereisten Gebieten. Während er von den Feuerländern und Neuseeländern keine hohe Meinung hat, schwärmt er von den Tahitianern. Was er als Zeitzeuge der Kolonisation schildert, ist oft beklemmend: »Wo sich der Europäer auch hinwendet, scheint der Tod die Eingeborenen zu verfolgen.« Deutlich bringt er seine Empörung über die Sklaverei zum Ausdruck. Eine große Rolle in dem Buch spielen die Indianerkriege, die in den Jahren der »Beagle«-Expedition offenbar eskalierten. Darwin erzählt von der Furcht, indigenen Kriegern in die Hände zu fallen, und berichtet von tödlichen Überfällen auf Armeeposten. Von den Truppen, die gegen die Einheimischen aufgeboten wurden, hält er nicht viel: »Ich möchte meinen, eine solch schurkische, banditenartige Armee ward nie zuvor zusammengestellt.«

Von besonderem Interesse ist der Abschnitt über die Galapagosinseln. Darwin hält darin mehrere Besonderheiten fest, die ihm an der Tier- und Pflanzenwelt des Archipels auffielen. Er bemerkt, zahlreiche Galapagosarten seien nur auf diese Inselgruppe beschränkt, und sogar die einzelnen Inseln besäßen ihre jeweils eigenen Spezies, obwohl sie zumeist in Sichtweite zueinander lägen. Gleichzeitig jedoch, schreibt der Naturforscher, weise die Tier- und Pflanzenwelt eine ausgeprägte Verwandtschaft mit derjenigen Amerikas auf. Diese Beobachtungen erwiesen sich als wichtig für die Evolutionstheorie.

»Die Fahrt der Beagle« ist ein spannender Reisebericht, der aus wissenschaftlicher Sicht, aber auch als Zeitzeugendokument von hoher literarischer Qualität fasziniert. Das Buch ist reich bebildert mit Landschaftsaufnahmen der jeweiligen Gebiete, mit Tier- und Pflanzenfotos, mit historischen Zeichnungen und Gemälden und mit Abbildungen wissenschaftlicher Präparate. Textauszüge aus Darwins »Entstehung der Arten«, aus Robert Ritz Roys Reisebericht »Proceedings of the Second Voyage« und anderen Werken runden den Band gelungen ab.

Nicht ganz optimal erscheint, dass die doppelseitige Karte mit der Reiseroute der »Beagle« irgendwo mitten im Band platziert wurde, wo man sie leicht übersieht. Um beim Lesen immer wieder darauf zugreifen zu können, hätte sie nach vorn gehört, auf die inneren Umschlagseiten oder an ähnlich exponierte Stelle. Von diesem kleinen Manko abgesehen erweist sich der Band als fesselnde, ergiebige und bereichernde Lektüre.

Der Rezensent Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

MATHEMATIK

BLUMENSTRAUSS AN THEMEN

Das Onlinemagazin »Quanta« macht sich um die Vermittlung von Mathematik sehr verdient. Dieses Buch liefert eine Auslese der ersten Jahrgänge.

Thomas Lin (Hg.)
THE PRIME NUMBER CONSPIRACY
The Biggest Ideas in Math from Quanta
MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 2018
336 S., $ 19,95



Seit einigen Jahren berichtet das englischsprachige Onlinemagazin »Quanta«, getragen von der Wissenschaftsstiftung Simons Foundation, aus der Welt der Wissenschaft. Dabei nimmt die Mathematik eine herausragende Stellung ein. Dieses Buch versammelt ausgewählte Beiträge der ersten Jahrgänge.

Zu den behandelten Themen gehört eine »Verschwörungstheorie der Primzahlen«: Es sieht so aus, als wäre es den Primzahlen wichtig, wer unter ihresgleichen ihre nächsten Nachbarn sind. Enden sie mit der Ziffer 9, so ziehen sie es anscheinend vor, wenn die Nachfolgerin auf 1 endet, und schätzen es überhaupt nicht, wenn diese ebenfalls als letzte Ziffer die 9 hat. Solche Merkwürdigkeiten findet man leicht, indem man den Computer die Endziffernpaare benachbarter Primzahlen auszählen lässt. Aber niemand hatte sich diese Mühe gemacht, bis im März 2016 die Mathematiker Kannan Soundararajan und Robert Lemke Oliver von der Stanford University die Ergebnisse entsprechender Auszählungen veröffentlichten – und großes Erstaunen auslösten.

Natürlich ist es Unfug, den unschuldigen Primzahlen irgendwelche Vorlieben oder Abneigungen zuzuschreiben. Das gilt ebenso für die verbreitetere Vorstellung, die Verteilung der Primzahlen sei vom Zufall bestimmt. Aber solche Denkansätze helfen dem Verständnis ungeheuer auf, selbst dem der Fachleute, auch wenn diese solche Quellen der Erkenntnis nicht in ihren wissenschaftlichen Veröffentlichungen aufzuführen pflegen.

Umgekehrt erfordert es ein tiefes Verständnis und viel Mühe, aus einem

derartigen, streng formal strukturierten Text entsprechend anschauliche Vorstellungen zu extrahieren. Genau das leistet seit einigen Jahren »Quanta« unter dem Chefredakteur Thomas Lin, und zwar so überragend gut, dass beträchtlicher Ressourceneinsatz dahinterstecken muss. Die drei Hauptautoren Kevin Hartnett, Erica Klarreich und Natalie Wolchover schreiben in lockerem Stil, aber dennoch präzise, drücken sich elegant um problematische Details und hören rechtzeitig auf, bevor es zu schwierig wird – und zwar, ohne dass bei den Lesern ein frustrierter Nachgeschmack bleibt. Obendrein sind sie manchmal atemberaubend schnell: Ein Bericht davon, dass der Fields-Preisträger Peter Scholze dem ebenfalls renommierten Shinichi Mochizuki einen Fehler in dessen Beweis der ABC-Vermutung nachwies, erschien am selben Tag wie Scholzes wissenschaftliche Arbeit zum Thema.

Nicht von ungefähr hat **Spektrum** bereits einige Artikel aus »Quanta« übernommen. Bei der hohen Qualität der Beiträge stören sogar gewisse stilistische Eigenheiten nicht – etwa jene, dass jedes Stück auf die Person einer Wissenschaftlerin oder eines Wissenschaftlers fokussiert und deren Forschungsergebnis nur als einen von mehreren Aspekten behandelt. Und stets wird die Meinung eines Prominenten zum Thema zitiert, selbst wenn sie nur in der Aussage »Dieses Ergebnis ist bedeutend« besteht.

Nun gibt es all jene schönen Artikel online zur freien Verfügung – gut verlinkt, farbenfroh bebildert und kostenfrei. Ist es wirklich sinnvoll, Geld auszugeben, um die gleichen Texte in diesem Buch auf Papier gedruckt zu erhalten, unter Verzicht auf die meisten Abbildungen, darunter sämtliche Forscherporträts? Die persönliche Antwort des Rezensenten: ja, trotzdem. Natürlich könnte man sich auch vor dem Bildschirm die Muße nehmen, die es braucht, um die nicht einfachen Gedankengänge zu erfassen. Aber das fällt im Lehnstuhl einfach leichter.

Der Rezensent Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war lange Jahre Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

MOLEKULARBIOLOGIE

VERBESSERTE MENSCHEN?

Science-Slam-Europameister Martin Moder erklärt, inwieweit Erbgut-Optimierungen möglich und sinnvoll sind.

»Als Kind war ich dick und froh darüber«, schreibt der Molekularbiologe Martin Moder; heute wäre er es aber nicht mehr, da er sonst Gefahr liefe, als »Kugelschreiber« bezeichnet zu werden. Schon aus diesen ersten paar Sätzen seines Buchs sprechen Selbstironie und Alltagsbezug, zwei wichtige Grundbestandteile des Werks. Hinzu gesellt sich ausgeprägtes Fachwissen, mit dem der Autor ein komplexes Thema aufgreift: die Optimierung des Menschen. Dabei beschränkt er sich nicht auf die naturwissenschaftliche Seite, sondern rückt auch die gesellschaftspolitische in den Blick, indem er etwa moralische Aspekte aufgreift – freilich nie mit erhobenem Zeigefinger. Moder nimmt sich immer wieder selbst auf den Arm und wirkt dadurch sympathisch; seine Gags folgen dicht aufeinander und wecken oft das Bedürfnis, die Lektüre zu unterbrechen, um zu lachen oder die Stirn zu runzeln. Beim Lesen bekommt man Lust, den Science-Slam-Europameister live zu erleben, der seit 2016 im Wissenschaftskabarett »Science Busters« mitwirkt. An manchen Stellen ist sein Wortlaut allerdings etwas zu reißerisch.

Martin Moder
GENPOOLPARTY
Wie die Wissenschaft uns stärker, schlauer und weniger unausstehlich macht
Hanser, München 2019
208 S., € 19,00



Das 180-seitige Buch untergliedert sich in vier Kapitel, die – wie schon beim Vorgängerwerk »Treffen sich zwei Moleküle im Labor« (2016) – unabhängig voneinander lesbar sind. Der erste Abschnitt befasst sich mit dem menschlichen Genom. Moder beschreibt darin zunächst den Aufbau und die Organisation unseres Erbguts, was ihm anschaulich gelingt. An Beispielen erklärt er, wie Evolution funktioniert und wie künstliche Veränderungen im Genom vorgenommen werden können. Dabei führt er aktuelle Studien an und lässt seine Leser gewissermaßen aktiv an der Methodik teilhaben, indem er eine Do-it-yourself-Anleitung für die Genschere CRISPR/Cas präsentiert.

Moder erklärt, welche genetischen »Optimierungen« heute bereits möglich sind und wo einschlägige Probleme und Chancen liegen. Am Ende des Kapitels widmet er sich der Frage, was »optimieren« eigentlich bedeutet. Denn viele Merkmale des Organismus lassen sich nicht eindeutig als positiv oder negativ einstufen; zudem kann die Veränderung eines Merkmals (etwa einer bestimmten Krankheitsresistenz) unbeabsichtigte negative Auswirkungen zeitigen. Moder stellt klar, dass viele Eigenschaften nicht durch ein einzelnes Gen, sondern durch das Zusammenspiel vieler verschiedener bestimmt werden.

Im zweiten Kapitel beleuchtet der Molekularbiologe die Forschung dazu, auf welche Weise eine Eigenschaft wie Intelligenz überhaupt von den Genen bestimmt wird. Hierbei definiert er Grundbegriffe der Intelligenzforschung wie IQ-Wert und Korrelation. Dies ist der wohl komplizierteste Teil seines Buchs, allerdings schafft es Moder, trotz mathematischer Formeln einen trockenen Lehrbuchstil zu vermeiden, indem er seine Ausführungen mit unterhaltsamen Anekdoten spickt. Er gibt den Lesern einen Überblick über aktuelle Ansätze zur Intelligenzsteigerung, wobei er eine kritisch-distanzierte Haltung einnimmt. Dieses zweite Kapitel hat deutlich mehr Sachbuch- als Science-Slam-Charakter.

Der dritte und längste Abschnitt ist der menschlichen Verhaltensbiologie gewidmet. Der Autor driftet dort mitunter zu weit in die Gesellschaftskritik ab;

Welche Veränderungen am Genom möglich sind, legt Moder ausführlich dar

auch kommt sein Sprung von der Intelligenzforschung zur Fremdenfeindlichkeit etwas unvermittelt. Manche Äußerungen, etwa zum Thema Nationalsozialismus, erscheinen gedruckt sehr drastisch – gesprochen kommen sein Humor und seine Ironie sicherlich besser heraus.

Davon abgesehen vermittelt Moder seinen Lesern auch in diesem Teil interessante Erkenntnisse, beispielsweise zu den Themen Drogen oder Attraktivität. Fragen, die beinahe jeden Menschen beschäftigen, wie »Was macht glücklich?« oder »Was macht einen guten Menschen aus?« diskutiert der Autor in den letzten beiden Kapiteln, wobei es ihm im vierten vor allem um ethische Aspekte und die Zukunft geht. Ein Schlusswort rundet das Werk ab, in dem der Molekularbiologe anmerkt, dass Biologie »ein chaotischer Sauhaufen« sei. Insgesamt findet er aber: »So schlecht (…) stellen wir uns gar nicht an.«

Ausführlich legt der Autor dar, welche Veränderungen am Genom bereits möglich sind oder in Zukunft sein werden. Die Frage, inwieweit es sinnvoll ist, Menschen zu optimieren, will er jedoch den Wissenschaftsphilosophen überlassen. Das Buch regt sowohl zum Lachen als auch zum Nachdenken an (zwei durchaus sinnvolle Optimierungen), stützt sich auf ein solides wissenschaftliches Fundament und bietet ein umfangreiches Literaturverzeichnis für alle, die mehr wissen wollen.

Die Rezensentin Annika Röcker ist promovierte Biochemikerin und Wissenschaftsjournalistin.

ORNITHOLOGIE
RÄTSEL DER RASTLOSEN

Ein Vogelkundler stellt die wichtigsten Zugvögel, ihre Routen und erstaunlichen Flugleistungen vor – ebenso wie die Gefahren, die unterwegs drohen.

Noch im 18. Jahrhundert waren viele davon überzeugt, dass Schwalben im Schlamm von Gewässern überwintern. Sie sahen, wie die Schwalben nach der Brutzeit zu Tausenden in Schilfflächen einfielen – und wie sie im Winter plötzlich alle verschwunden waren. Der logische Schluss daraus: Die Vögel konnten sich nur im Schlamm versteckt haben.

Heute sind die Wanderungen der mehr als 50 Milliarden Zugvögel, die jedes Jahr hunderte oder tausende Kilometer weit in ihre Winterquartiere fliegen, in etlichen Details aufgeklärt. Der Biologe und Vogelschützer Klaus

Richarz berichtet in seinem Buch viel Wissenswertes darüber, wobei er auf das Reiseverhalten, den Orientierungssinn, die Rastgebiete sowie die Ernährung der Tiere eingeht und die entsprechenden wissenschaftlichen Untersuchungsmethoden erörtert. Dabei stellt er ausgewählte Arten mit ihren Besonderheiten vor. So sind Meisen häufig zusammen mit Vertretern anderer Arten unterwegs, während Lerchen bevorzugt unter sich bleiben und Laubsänger eher allein fliegen. Bei Amseln wiederum zeigen sich die Weibchen deutlich reiselustiger als die Männchen, die eher in ihrem Siedlungsgebiet verweilen.

Klaus Richarz
VOGELZUG
WBG Theiss, Darmstadt 2019
192 S., € 38,–



Richarz erklärt, wie Vögel navigieren, und stellt deren unterschiedliche Flugrouten vor. Gerade in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten haben Vogelforscher dank innovativer Untersuchungsmethoden viele neue Entdeckungen gemacht. Dazu gehört die Satellitentechnik: Geeignet große Vögel bekommen die inzwischen nur noch wenige Gramm schweren GPS-Geräte wie einen Minirucksack umgeschnallt, was deren Reiserouten detailliert aufzuklären hilft. Mit Hilfe der Satellitenüberwachung ist es beispielsweise möglich, herauszufinden, ob die Tiere über Berge hinwegfliegen oder drum herum. Sie hat auch die Erkenntnis geliefert, dass die unerfahrenen Jungtiere des Schreiadlers das Mittelmeer an breiten Stellen überfliegen, während die Alttiere thermisch günstigere Wege um das Gewässer herum bevorzugen.

Nebenbei erwähnt Richarz einige Rekorde der Vielflieger. So kann die Reise bei manchen Vögeln ein halbes Jahr dauern. Das führt bei Rußseeschwalben *(Onychoprion fuscatus)* mitunter dazu, dass die Tiere als Jungvögel starten und ausgewachsen ankommen. Ein weiterer Rekord: Mauersegler *(Apus apus)* verbringen die zwei Jahre vom Flüggewerden bis zur ersten Landung am Brutplatz durchgängig in der Luft. Um so lange zu fliegen, nutzen sie einen Trick: Sie schlafen jeweils nur mit einer ihrer Hirnhälften, während die andere wacht.

Richarz war einmal in der universitären Forschung tätig, wechselte dann aber in die Naturschutzverwaltung der Landesämter. Dementsprechend berichtet er ausführlich über die vielen Risiken des Vogelzugs. Dazu gehören natürliche Räuber, die auf ihre Beute lauern, vor allem aber Hauskatzen und menschliche Jäger. Fotos in dem Buch zeigen nicht nur tellerweise gebratene Grasmücken (eine Gattung von Singvögeln), sondern auch die Netze, mit denen sie gefangen werden. Hierzu kann der Autor freilich auch Positives berichten: Gerade in Italien, das früher zu den führenden Ländern der Vogeljagd zählte, sind erfolgreich Schutzprogramme aufgelegt worden. Leider rücken nun neue Bedrohungen in den Fokus, nämlich die schädlichen Folgen des Klimawandels sowie die Risiken von Freilandleitungen, rotierenden Windrädern, Lichtverschmutzung, Pestiziden und Plastikmüll.

Das Buch vermittelt viel Wissenswertes über Zugvögel und ihre Flugkünste. Anschauliche Grafiken laden dazu ein, deren Reiserouten zu studieren. Zahlreiche hochwertige Farbfotos von Vögeln und Landschaften sind allein schon optisch ein Genuss. Der sachlich geschriebene Text führt verständlich ins Thema ein und bildet den aktuellen Forschungsstand weitgehend ab; das Literaturverzeichnis listet Arbeiten bis 2017. Am Ende widmet sich der Autor dem grenzüberschreitenden Schutz von Zugvögeln und stellt Orte meist in Deutschland vor, wo sich die Tiere in Schutzgebieten gut beobachten lassen – etwa auf Helgoland, den Rieselfeldern bei Münster oder am Chiemsee.

Die Rezensentin Katja Engel ist promovierte Ingenieurin und Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

DEMOGRAFIE
EINE WELT SO VOLL WIE NOCH NIE

Was verraten demografische Daten über künftige Entwicklungen?

Eine erstaunliche und folgenreiche Entwicklung prägt die Welt seit dem 19. Jahrhundert. Nimmt man für die Zeit Julius Cäsars im 1. Jahrhundert v. Chr. noch eine Weltbevölkerung von rund 250 Millionen Menschen an, so hatte sie sich bis zum 19. Jahrhundert (also in zwei Jahrtausenden) auf gerade einmal eine Milliarde vervierfacht. Doch seither – sprich, in den zurückliegenden 200 Jahren – ist sie auf 7 Milliarden Menschen explodiert. Der britische Demografieforscher Paul Morland widmet sich diesem globalen Sprung in der Bevölkerungszahl und seinen gesellschaftlichen Auswirkungen. Dazu stellt er zunächst die historische Bedeutung der Bevölkerungswissenschaft heraus. Anschließend betrachtet er den demografischen Wandel auf allen Kontinenten.

Die frühere europäische Dominanz gründete auf Bevölkerungswachstum

Morland richtet seinen Blick zunächst auf England. Im Mittelalter und der frühen Neuzeit durchlief die Einwohnerzahl dort zyklische Veränderungen: auf langsame und stetige Wachstumsphasen folgten Einbrüche infolge von Seuchen, Hunger und Kriegen. Ab etwa 1800, der Zeit der beginnenden Industrialisierung, änderte sich das. England hatte nicht wie Kontinentalstaaten unter durchziehenden Armeen zu leiden, Seuchenausbrüche ließen im Zuge medizinischer und technischer Verbesserungen nach und die Nahrungsmittelversorgung verbesserte sich durch weltweiten Handel. Die Sterberate sank, zugleich stieg die Fertilitätsrate,

Paul Morland
DIE MACHT DER DEMOGRAFIE
und wie sie die moderne Welt erklärt
Aus dem Englischen von Hans-Peter Remmler
Ecowin, München 2019
430 S., € 26,–



englische Frauen brachten also mehr Kinder auf die Welt, von denen weniger starben. Begünstigt wurde dies durch das Absinken des durchschnittlichen Heiratsalters von 26 auf 23 Jahre, eine Veränderung, die laut Morland zu drei zusätzlichen Jahren Fertilität pro Frau führte.

Die veränderten wirtschaftlichen und technischen Verhältnisse griffen auf den europäischen Kontinent über und führten in der Folge auch hier zum Anwachsen der Bevölkerung. Zu den vielen Folgen gehörten Migrationsbewegungen in die außereuropäische Welt hinein. Ihre wirtschaftliche und militärische Umsetzung erfolgte im Rahmen des Kolonialismus. Für lange Zeit begründeten sie die globale europäische Dominanz.

Wie sehr Bevölkerungszuwachs und wirtschaftlich-militärische Macht bis heute miteinander verknüpft sind, zeigt Morland am Beispiel Chinas. Der gigantische Staat unterhält nicht nur eine große und zunehmend besser gerüstete Armee, sondern verfügt auf Grund seiner Einwohnerzahl über ein gewaltiges Produktivpotenzial und stellt einen riesigen Wirtschaftsmarkt.

Heute jedoch schlagen weit reichende Veränderungen in der demografischen Entwicklung durch. Denn während die Lebenserwartung enorm zugenommen hat, geht die Geburtenrate insbesondere in den westlichen Ländern zurück. Zu den Ursachen zählen Empfängnisverhütung, ein höheres Bildungsniveau und die Berufstätigkeit von Frauen. In Ländern wie China wiederum zeitigt die ehemalige Ein-Kind-Politik ihre Folgen. Das wird globale Auswirkungen haben, wie Morland prognostiziert: Das Durchschnittsalter werde steigen, das Bildungsniveau zunehmen und die Bevölkerungen gesetzter und weniger risikobereit sein – was Gewaltkonflikte weniger wahrscheinlich mache. Die europäische beziehungsweise die westliche Dominanz werde weiter zurückgehen.

Die grundlegenden Entwicklungen, die Morland beschreibt, sind keineswegs neu und inzwischen gut untersucht. Auch die globale Bedeutung der Bevölkerungsentwicklung ist unbestritten. Problematischer erscheint jedoch die Deutung statistischer Daten. So kann man unterschiedlicher Ansicht darüber sein, ob eine ältere Bevölkerung in jedem Fall gesetzestreuer und weniger risikobereit ist. Morland betont zwar, dass er dies keinesfalls verallgemeinern möchte, da immer auch wirtschaftliche und politische Faktoren eine Rolle spielen. Äußerst spekulativ erscheint es jedoch, wenn er argumentiert, dass Syrien vielleicht nie im Bürgerkrieg versunken wäre, hätte das Durchschnittsalter seiner Bevölkerung (zirka 24 Jahre) näher an dem der Schweiz (zirka 42 Jahre) als an dem des Jemen (zirka 19 Jahre) gelegen.

Zwar ist das Buch eine Fundgrube für statistische Vergleiche. Doch leider erfolgen diese, von wenigen Tabellen abgesehen, ausschließlich im Text. Auf Grafiken oder Karten haben Autor und Verlag komplett verzichtet. Unterm Strich eignet sich das Werk dennoch für historisch und weltpolitisch interessierte Leser, die den komplexen globalen Entwicklungen der zurückliegenden 200 Jahre auf Basis demografischer Zusammenhänge nachgehen möchten. Historische Kenntnisse sollten vorhanden sein.

Der Rezensent Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

NATURSCHUTZ
EINLADUNG AN DIE FALTER

Wie sich schmetterlingsfreundliche Gärten anlegen lassen.

Schmetterlinge legen ihre Eier nur auf Pflanzen ab, von denen sie sich ernähren. Das bedeutet aber, man kann gezielt Lebensräume für sie schaffen. Ob im Garten, auf der Terrasse oder dem Balkon: Wo immer es vielfältig blüht, können auch seltene Falter einen Zufluchtsort finden, denen es an Nektar- und Futterpflanzen in offener Landschaft mangelt.

Die Biologin Elke Schwarzer zeigt in ihrem inhaltlich ansprechenden und gut strukturierten Ratgeber, wie man regelrechte Kinderstuben für Schmetterlinge schaffen kann. Dabei beschreibt sie – vom kleinen Brennnesselareal bis zur großen Blumenwiese – die für die jeweiligen Falter geeigneten, heimischen Pflanzenarten und -sorten. 20 häufige, auffällige Schmetterlingsspezies stellt die Autorin mit detailgenauen Farbfotos vor. Auch auf die typischen Raupenfutterpflanzen und Fördermaßnahmen zur Ansiedelung geht sie ein, jeweils ergänzt von kurzen Steckbriefen zu ausgewählten Tieren und Gewächsen.

Elke Schwarzer
MEIN SCHMETTERLINGSGARTEN
Schöne Pflanzen für Falter und Raupe
Ulmer, Stuttgart 2019
128 S., € 16,95



Von Barbarakraut bis Zypressen-Wolfsmilch, von Alant bis Ziest als »besondere Lockangebote« gibt Schwarzer gärtnerisch wertvolle Tipps, wobei sie die Futtergräser, -stauden und -sträucher eingehend beschreibt. Noch mehr Raupenfutter und spezielle Nektarpflanzen listet sie in einem Servicekapitel am Ende des Buchs auf; dort finden sich auch Literaturtipps. Ein Bezugsquellenverzeichnis für die Futterpflanzen sowie ein Nachschlageregister der Arten beschließen das nützliche und schöne Buch.

Der Rezensent Manfred Feyk ist Geograf, Geoinformatiker und Journalist.

LESERBRIEFE

BEWUSSTSEIN OHNE FREIEN WILLEN?

Die Psychologin Susan Blackmore befasste sich mit dem Rätsel des menschlichen Bewusstseins. (»Das schwierigste Problem«, **Spektrum** Februar 2019, S. 30)

Rainer Nawrocki, Bocholt: Wenn man sich mit der modernen Hirnforschung beschäftigt, fällt auf, dass in vielen Publikationen der freie Wille keinen Platz mehr findet. Das bedeutet, dass das neuronale Netz in unserem Gehirn allein auf Basis von elektrochemischen Aktivitäten unser Verhalten steuert.

Aber welchen evolutionären Vorteil bringt ein Bewusstsein, wenn das neuronale Netz sowieso alles entscheidet? Warum erscheinen dann Teile der neuronalen Verarbeitung wie auf einem Computerdisplay, zu der jedoch die Tastatur und die Maus fehlen? Wozu ein Bewusstsein, das nur unnötig Energie verbraucht und über erhöhte Nahrungsaufnahme »gefüttert« werden muss?

Das Bewusstsein befindet sich interessanterweise in den Teilen des neuronalen Netzes, die wichtig für die Kommunikation sind. Es ist sinnvoll zu beschreiben, was ich sehe oder höre, aber keiner interessiert sich so richtig für meinen Herzschlag oder wie meine Verdauung abläuft. Von Bedeutung sind allerdings ebenfalls Erfahrungen und Wissen.

Dieses Bewusstsein bekommt in der Entwicklung vom Baby zum Erwachsenen über eine Sprache eine Begriffswelt, die kommuniziert werden kann. Am Anfang hat das Baby Hunger oder auch Schmerzen und weint. Es kommuniziert damit mit den Eltern. Später kommen das Sprechen und andere nonverbale Kommunikationsmittel hinzu.

Je nach kulturellem Umfeld und dem emotionalen Verhalten der Eltern baut der sich entwickelnde Mensch eine Sprache auf, um mit anderen Menschen wichtige Informationen auszutauschen, die im Bewusstsein zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist das Gehirn sehr flexibel und kann eine beliebige Sprache verwenden.

Die Verknüpfung von Gehirnen musste auf diese etwas komplizierte Art und Weise erfolgen, da sich die Neurone von zwei Menschen nicht direkt miteinander verbinden können. Man kann so auch erklären, dass ein Bewusstsein und damit die Kommunikation vom menschlichen Baby zum Erwachsenen immer mächtiger wird. Hiermit entfällt die müßige Diskussion, in welcher Entwicklungsstufe Bewusstsein eigentlich entstanden ist. Es handelt sich einfach um eine graduelle Entwicklung und nicht um etwas schlagartig Einsetzendes.

Von dieser These ausgehend ergibt sich ein geschlossenes Konzept, in dem man gut ohne die These »freier Wille« auskommt. Es scheint aber so zu sein, dass der Glaube an einen freien Willen dem Menschen in seiner Entwicklung geholfen hat und ihm einen Antrieb gab und gibt.

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

KEINE LEHRER IM TIERREICH

Die Linguistin Christine Kenneally ging der Frage nach, warum der Mensch sprechen kann. (»Der Rede wert«, **Spektrum** März 2019, S. 30)

Michael Gansera, per E-Mail: Der Artikel von Frau Kenneally liefert das, was der Artikel des Februarhefts vermissen ließ, nämlich eine dem Stand der Wissenschaft entsprechende Darstellung intellektueller und kognitiver Leistungen bei Tieren. Danke dafür.

Ganz besonders freut mich die Darstellung der Resultate der Versuche von Heidi Lyn und Michael Tomasello bezüglich des Verstehens und Ausübens von Zeigen. Exakt das, so sage ich meinen Schülern (in humoristisch zugespitzter Form), ist der Faktor, der uns Menschen vom übrigen Tierreich trennt: »Das Tierreich hat euch gegenüber einen großen Vorteil: Es gibt keine Lehrer!«

Neue Verhaltensweisen werden selbst bei höchstentwickelten Säugetieren nicht beigebracht, sondern nur zufällig abgeguckt. Daher dauert die Traditionsbildung immer Generationen. Dieser Faktor »Lehrer« ist meines derzeitigen Wissens der einzige nicht graduelle, sondern qualitative Unterschied, der den Menschen vom übrigen Tierreich trennt.

Christian Stangl, Fürstenfeldbruck: Der Artikel von Christine Kenneally wäre nicht der Rede wert, versammelte er nicht erneut alle Kapitalfehler der heutigen evolutionären Anthropologie bezüglich der entscheidenden Frage: Was macht die Einzigartigkeit des Menschen aus? Kenneally spricht meist ohne nähere Bestimmung von Sprache schlechthin, weil tierische und menschliche Sprache für sie quasi ein evolutionäres Kontinuum darstellen. Sie missachtet also, dass Tiere im Wesentlichen stets auf ihrer Sprachstufe verbleiben – geringe kulturelle und regionale Variationen zugestanden –, während Menschen fortwährend unterschiedlichste Sprachen mit vielen, enorm differierenden Komplexitätsstufen hervorbringen.

Zweiter, damit einhergehender Fehler: Sie spricht von Sprachevolution, die nicht genetisch begründet sei. Hebt aber nicht klar und eindeutig voneinander ab:

einerseits die genetische Evolution einer unbedingten Voraussetzung, die Sprache erst menschlich macht, des einzigartigen Denkvermögens des Menschen; davon andererseits die kulturelle Entwicklung von menschlicher Sprache als bloßem Mittel zum Austausch spezifisch menschlichen Denkens.

Menschliche Sprache wird gespeist aus einem ständigen Rückkopplungsprozess zwischen unbewusstem und bewusstem Denken. Nahezu all unsere Sprache – außer dem leitenden Gedanken – fließt uns unbewusst zu. Nur die gleichzeitige gedankliche Kontrolle und nachträgliche Fehlerkorrektur sind bewusst. Diese Autonomiefähigkeit macht aus reflexhaft-unbewusstem Denken unbeschränkt entwicklungsfähiges, daher ein bewusstes Denken des Menschen. Dann aber muss klar sein: Solange Mutation und Selektion herrschten – also während der zirka zwei Millionen Jahre der Evolution der Homininen, die primär tierische Sprachansätze kennzeichneten –, konnten rein graduelle Verbesserungen des tierischen Gedankenaustauschs nicht fließend in eine hochflexible und -variable Kulturentwicklung von Menschen übergehen. Und das geschah ganz offenkundig auch nicht, obwohl sich das Gehirnvolumen der Gattung *Homo* in dieser Zeitspanne auffälligerweise verdoppelte. Bis eben der vollwertige, moderne Mensch auftrat, der bei gleich bleibendem Gehirn den Beginn einer kulturellen Explosion anzeigte.

Alle Fehler Kenneallys sind in ihrer Feststellung angelegt: »Bei den Bonobos war nicht die Biologie, sondern die Kultur entscheidend.« Diese zieht den Kurzschluss vom Entstehen menschlicher Sprache durch bloße Kumulation von tierischen Lernerfolgen nach sich: »Das ständig wiederholte Lernen erwies sich als Schmelztiegel, in dem Sprache entstand.« Damit projiziert sie die kulturelle Entwicklung bereits menschlicher Sprache zurück in die Ära biologischer Evolution. Die vollkommen gegensätzliche Funktionsweise von Evolution und Entwicklung bleibt aber Teil des Problems, das die Entstehung menschlicher Sprache aufwirft; zumindest solange, wie auch der qualitative Sprung zwischen Tier und Mensch als solcher nicht erkannt wird.

MOND UND PLATTENTEKTONIK

Nach jüngsten Untersuchungen spielten die Bewegungen von Erdplatten bei der Entwicklung des irdischen Lebens eine entscheidende Rolle. (»Leben durch Plattentektonik«, **Spektrum** März 2019, S. 42)

Manfred Schlabbach, Berlin: In dem Artikel von Rebecca Boyle vermisse ich einen Hinweis auf den Einfluss des Mondes auf die Plattentektonik. Bekanntlich hat die Umdrehung der Erde im Lauf von Jahrmillionen abgenommen. Wo ist diese Rotationsenergie geblieben?

Der Mond kehrt uns immer genau dieselbe Seite zu, weil ihn die Erde mit ihrer Gravitation zum (zur Erde relativen) Stillstand gebracht hat. Wir wissen nichts über eine



NUDIBLUE / STOCK.ADOBE.COM

Die Silfra-Spalte auf Island verbreitert sich auf Grund des Auseinanderdriftens der eurasischen und der nordamerikanischen Platte jährlich um rund sieben Millimeter. Wirkt daran womöglich auch der Mond mit?

frühere Mondeigenrotation, können also nichts über die verlorene Rotationsenergie des Mondes sagen.

Auf der Erde ist das anders. Wir sehen den Einfluss des Mondes auf die Weltmeere, und vermutlich unterliegen auch die Luftschicht und die Erdkruste den Gezeiten. Die Erdkruste ist relativ starr, daher können sich Gezeitenkräfte nur auf das Magma darunter auswirken. Vielleicht sind das lediglich ein paar Zentimeter, die sich die Erdkruste zwischen Ebbe und Flut mitbewegt. Es sind ja auch bloß ein paar Zentimeter, die sich die Kontinente im Lauf eines Jahres gegeneinander bewegen.

Letzten Endes wird die gesamte Gezeitenenergie in Wärme umgewandelt. Es wäre eine interessante Forschungsaufgabe, die Energiebilanzen zu vergleichen: den Gezeiteneinfluss des Mondes auf das Magma einerseits gegen den Energiebedarf für die Plattentektonik andererseits.

Sie haben Aliens im Haus?

Wir sagen Ihnen, was zu tun ist.
Eine Kurzgeschichte von Laura Pearlman

Die beste Strategie ist natürlich immer: sie gar nicht erst hereinzulassen. Aber vielleicht haben Sie Ihren Schornstein nicht abgedichtet oder ein Loch im Fliegengitter übersehen, und jetzt flitzt ein winziges Raumschiff der Außerirdischen in Ihrem Wohnzimmer oder in Ihrer Küche herum oder jagt unter Ihrem Esstisch durch. Es hat dann wirklich keinen Sinn, sich selbst die Schuld zu geben oder darüber zu spekulieren, welches Ihrer Kinder vielleicht die Eingangstür offen gelassen hat, während sie alle nach den Feiertagen ihre Autos vollpackten, um Sie dann wieder einmal in Ihrem leeren Nest zurückzulassen.

Jedenfalls sind Sie jetzt allein im Haus mit Ihren zwei Katzen und etwas, das aussieht wie ein kleiner fliegender Saugroboter in leuchtendem Pink. Das Erste, was Sie tun müssen, ist dreimal ruhig und tief Luft holen – außer natürlich, Ihre Katze macht einen seltsamen Trillerton, wie ihn diese Tiere beim Anblick eines Vogels gern ausstoßen. In dem Fall müssen Sie zuallererst Ihren Stubentiger schleunigst aus dem Zimmer schaffen, bevor er hochzuspringen versucht und die Außerirdischen ihn deshalb mit einer ihrer Energiekanonen zerfetzen.

Lassen Sie zu, dass die Außerirdischen mitnehmen, was immer sie haben wollen

Nachdem Sie Ihre Katze sicher in einen anderen Raum gesperrt haben – vielleicht ins Schlafzimmer, wo Ihre zweite Katze bereits ängstlich unterm Bett kauert – und nachdem Sie etwaige Kratzer medizinisch versorgt haben, die Sie sich dabei zuzogen, können Sie zu Stufe eins zurückkehren. Wie gesagt: Holen Sie dreimal tief Luft. Und machen Sie sich bewusst, dass die allermeisten Menschen solche Begegnungen überleben, in der Regel sogar ohne allzu schwere Verletzungen.

Versuchen Sie den Aliens nicht im Weg zu stehen. Lassen Sie zu, dass sie mitnehmen, was immer sie haben wollen. Niemand weiß wirklich über ihre Motive Bescheid, aber die vorherrschende Theorie besagt, dass sie auf einer Art Schnitzeljagd sind und ein scheinbar zufälliges Mischmasch von Gegenständen sammeln wie Gummiringe, Erdnüsse, Buntstifte, Lippenstifte, Zehennägelschnipsel, Blutproben und Tränen.

Verfallen Sie dabei nicht in paranoide Spekulationen darüber, was die Aliens mit diesen Dingen anfangen werden. Das sind schließlich keine Hexen, sondern bloß Außerirdische.

Falls aus Ihrem Schlafzimmer Jaulen oder Fauchen dringt, könnte es sein, dass Sie anfangen zu bedauern, dass Sie die aufgeregte Katze mit der verschreckten Artgenossin in einen Raum gesperrt haben und damit den gesamten Fortschritt aufs Spiel setzen, den die zwei Tiere in den letzten drei Jahren gemacht haben, indem sie mühsam lernten, miteinander auszukommen. Vergessen Sie's! Hier gilt nur eine Regel: Sie müssen sich auf die Außerirdischen konzentrieren.

Beobachten Sie das Raumschiff und finden Sie heraus, was es will. Wenn es wiederholt gegen eine Zimmertür, einen Schrank oder eine Schublade stößt, dann möchte es haben, was darin ist. Am besten öffnen Sie die Tür oder die Lade oder was auch immer, bevor die Aliens ungeduldig werden und Ihre Sammlung von Stielgläsern in einen Tümpel aus geschmolzenem Glas verwandeln, inklusive womöglich der hübschen Champagnerflöten, die noch vom Fest auf der Anrichte herumstehen.

Wenn Sie einen Feuerlöscher besitzen, behalten Sie ihn am besten bei sich, während Sie den Besuchern durch das ganze Haus folgen.

Falls das Raumschiff in der Nähe Ihrer Augen schwebt, entfernen Sie sofort Ihre Kontaktlinsen und platzieren Sie sie auf der nächsten Tischplatte oder Ablage. Unbedingt. Sie wollen doch nicht, dass die Aliens sie selbst herausnehmen, oder? Wenn das Schiff knapp vor irgendeinem anderen Teil Ihres Körpers verharrt, halten Sie still und lassen es jede gewünschte Gewebeprobe entnehmen. In der Regel wird es etwas Kleines, nicht allzu Wichtiges sein.

Drücken Sie danach fest auf die Schnittstelle(n). Falls die Blutung mehr als fünf Minuten andauert, wählen Sie den Notruf 112, und ein Rettungswagen wird sich auf den Weg machen. Erwähnen Sie dabei unbedingt, dass Aliens im Haus sind, und bleiben Sie am Telefon, bis sie wieder abfliegen. Die Außerirdischen werden jeden

Mehr Sciencefiction-Kurzgeschichten auf
spektrum.de/kurzgeschichte/

einäschern, der versucht, einzudringen oder sich zu entfernen; deshalb ist es wichtig, dass die Sanitäter draußen warten, bis die Aliens fort sind.

In diesem Zusammenhang sei betont: Alle Außentüren und Fenster müssen fest verschlossen bleiben.

Wenn das Raumschiff irgendwann auch in den Raum eindringen will, in den Sie Ihre Haustiere gesperrt haben, bleibt Ihnen gar keine Wahl, als es zuzulassen. Ihre Katzen dürften inzwischen so sehr in Panik sein, dass sie den Aliens aus dem Weg gehen, und solange sie das tun, geschieht ihnen nichts. Die Außerirdischen scheinen sich für Katzen überhaupt nicht zu interessieren – woran man im Übrigen auch sieht, dass es sich um Aliens handelt.

Schließlich wird das Schiff zur Eingangstür schweben oder zu einem Fenster. Das bedeutet, dass die Aliens alles gesammelt haben, was sie wollten, und an diesem Punkt bleibt Ihnen nichts mehr zu tun, als sie hinauszulassen.

Glückwunsch! Sie haben Ihre erste Begegnung mit Außerirdischen überlebt. Löschen Sie jetzt sämtliche Schwelbrände. Falls Sie 112 gewählt haben, teilen Sie mit, dass die Sanitäter nun gefahrlos hereinkommen können. Geben Sie Ihren Katzen etwas Leckeres, vielleicht beruhigt es sie. Reiben Sie mit einem sauberen, trockenen Tuch über alle Blutflecken auf dem Teppich, geben Sie dann ein wenig Sprudelwasser drauf und wischen Sie noch einmal nach. Unter Umständen würde sich dort ja etwa eine Brücke oder ein Läufer gar nicht schlecht machen. Senden Sie Ihren Freunden, die Sie eigentlich gerade hatten treffen wollen, eine bedauernde Nachricht, und laufen Sie zum Getränkeshop, um sich zur Belohnung eine Flasche Champagner zu kaufen. Auch wenn die Champagnerflöten nicht überlebt haben sollten.

Vergessen Sie aber auf gar keinen Fall, beim Hinausgehen die Haustür hinter sich zu schließen.

nature

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 563, S. 730, 29. November 2018

DIE AUTORIN

Laura Pearlman hat ihre Geschichten unter anderem in »Shimmer«, »Flash Fiction Online« und »Daily Science Fiction« publiziert. Auf Twitter ist sie unter @laurasbadideas zu finden.



Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich.

Ansprechpartnerin Anja Väterlein: anja.vaeterlein@iqm.de

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, Tel.: 06221 9126-733 E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1. 1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



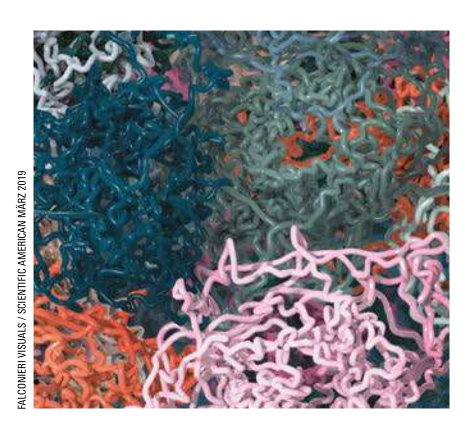


VORSCHAU



TROPISCHE GEOMETRIE

In den letzten Jahrzehnten ist ein neues Fachgebiet entstanden, bei dem Mathematiker geometrische Objekte so stark verändern, dass nur ein »Skelett« der eigentlichen Form zurückbleibt. Trotz der massiven Vereinfachungen behalten die Strukturen viele ihrer ursprünglichen Eigenschaften bei – und offenbaren so unerwartete Geheimnisse.


FALCONIERI VISUALS / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019

KONTROLLIERT VERHEDDERT

Die DNA einer menschlichen Zelle passt trotz ihrer Gesamtlänge von etwa zwei Metern in den winzigen Zellkern. Hierfür ist sie unvorstellbar dicht aufgewickelt. Neue Erkenntnisse zeigen nun, wie es der Zelle gelingt, Ordnung in dem Gewirr zu halten: mit molekularen Ringen und Schlaufen.


NASA, GSFC

DER WEG ZUR MONDSTATION

In Zukunft könnte eine Siedlung auf dem Erdtrabanten entstehen. Doch erst müssen Wissenschaftler noch eine Reihe von Problemen lösen.


FOTOLIA / FOTOS 593; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DIE ERFINDUNG DES KRIEGES

Liegt uns das kollektive Töten im Blut? Archäologische Funde und ethnografische Berichte zeichnen ein anderes Bild. Demnach sind wir evolutionär nicht auf militärische Konflikte programmiert.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.
Registrierung unter:
spektrum.de/newsletter